

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"> ☐ Exploiter une représentation graphique d'un champ vectoriel, identifier les zones de champ uniforme, de champ faible et l'emplacement des sources. ☐ Tracer l'allure des cartes de champs magnétiques pour un aimant droit, une spire circulaire et une bobine longue. ☐ Décrire un dispositif permettant de réaliser un champ magnétique quasi uniforme. ☐ 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"> ☐ Exploiter les propriétés de symétrie et d'invariance des sources pour prévoir des propriétés du champ créé. ☐ Évaluer l'ordre de grandeur d'un champ magnétique à partir d'expressions fournies. ☐ Définir le moment magnétique associé à une boucle de courant plane. ☐ Associer à un aimant un moment magnétique par analogie avec une boucle de courant. ☐ 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 : $X(M,t)$ | ◇ Stationnaire : indépendant temps : $X(M,t) = X(M)$ |
| ◇ Vectoriel : $\vec{X}(M,t)$ | ◇ Uniforme : indépendant position : $X(M,t) = X(t)$. |

Exemple I1.1 : Champs scalaire et vectoriel

- ◇ À deux dimensions, le champ d'**altitude** peut être défini sur une carte de randonnée. En tout point (x,y) de la carte, une grandeur **scalaire** $z(x,y)$ est définie.
- ◇ On peut définir des champs **scalaires** de **pression** $p(x,y)$ ou de **température** $T(x,y)$ sur une carte météorologique.
- ◇ On peut définir un champ de **vitesse** du vent $\vec{v}(x,y)$ où un **vecteur** est défini en tout point d'une carte : sa **direction** autant que sa **norme** importent ;
- ◇ On peut aussi définir un champ de **force gravitationnelle** $\vec{F}(x,y,z)$ dans tout l'espace, qui pointe toujours vers le centre de la Terre.

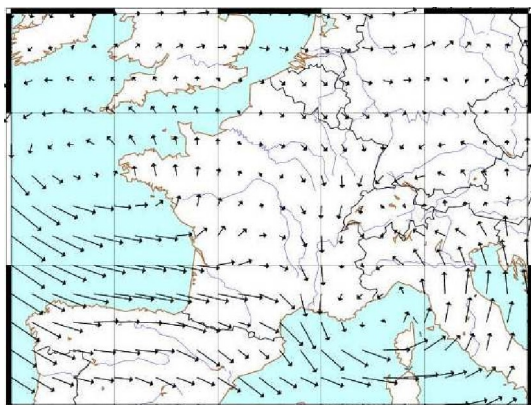


FIGURE I1.1 – Champ vectoriel du vent.

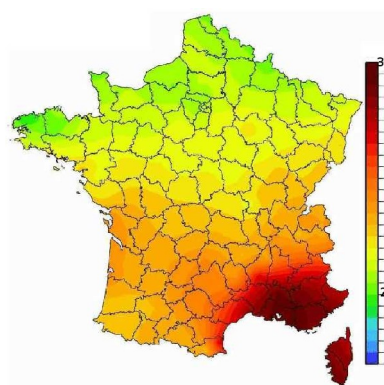
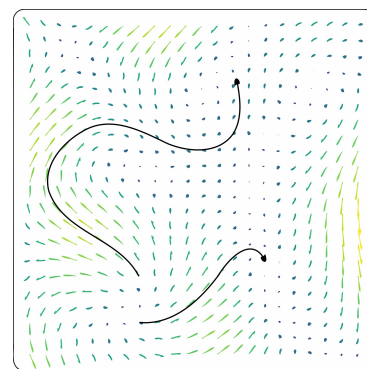


FIGURE I1.2 – Champ scalaire de la température.

Définition I1.2 : Cartes et lignes de champ

Pour représenter un champ vectoriel, on utilise des :

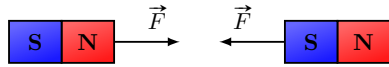
- ◇ **cartes de champ** : à chaque point de l'espace est associé un **vecteur** donnant le **sens** et la **norme** du champ ;
- ◇ **lignes de champ** : ce sont les **courbes orientées, tangentes au champ** que l'on obtient en suivant le champ de proche en proche. Chaque ligne indique le **sens** du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



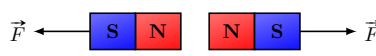
I/B Interaction entre aimants

Observation I1.1 : Interactions entre aimants

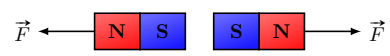
Situation A



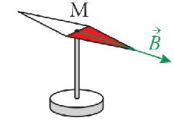
Situation B



Situation C

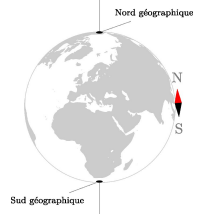


- ◇ Deux aimants peuvent s'**attirer** ou se **repousser** selon la façon dont on les oriente ;
- ◇ Le champ magnétique peut être mis en évidence avec un petit aimant en forme d'aiguille (boussole) ;



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** : celle d'une aiguille aimantée ;
- ◇ **son sens** : va du pôle Sud au pôle Nord de l'aiguille ;
- ◇ **sa norme** : s'exprime en tesla (T).

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 :

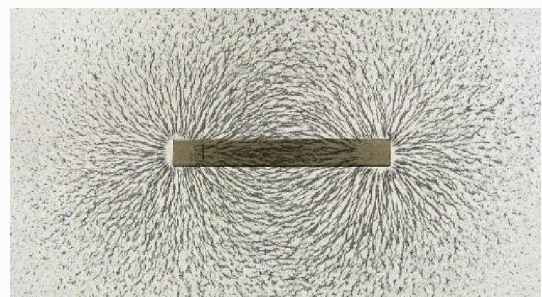


FIGURE I1.3 – Limaille sur aimant droit.

♥ Propriété I1.1 : Géométrie des lignes de champ

Les lignes de champ du champ magnétique sont des **courbes fermées** qui sortent de l'aimant par le pôle Nord et y rentrent par le pôle Sud.

Exemple I1.2 : Aimant droit

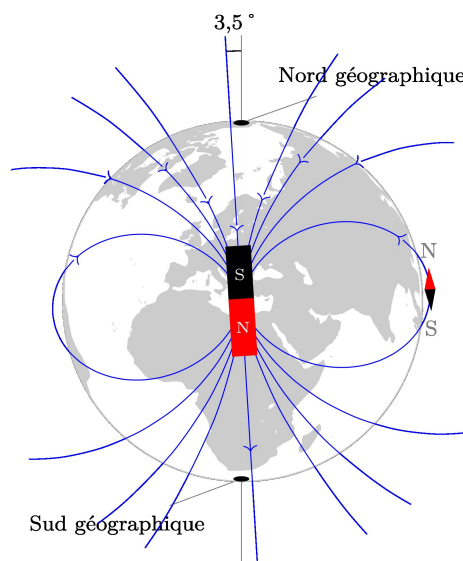
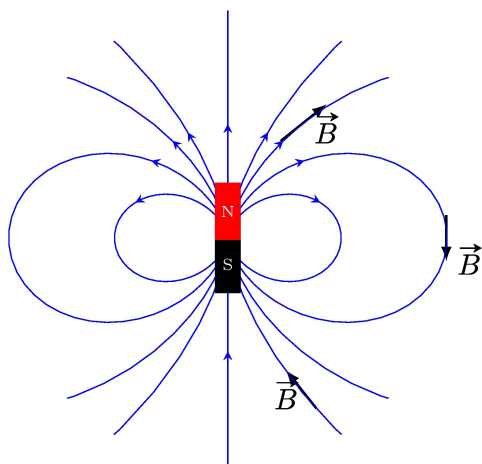


FIGURE I1.4 – Schématisation des lignes de champ dans un aimant droit, et schématisation du champ magnétique de la Terre comme celui d'un aimant droit. Une boussole à la surface de la Terre pointe vers le **pôle Sud magnétique** de la Terre, qui est proche du Nord géographique.

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.

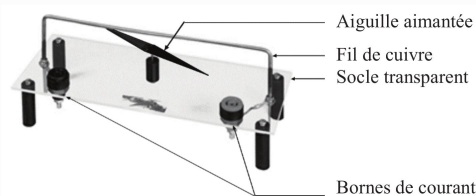


FIGURE I1.5 – Dispositif d'ERSTED

Observation I1.2 : Expérience d'ERSTED

- ◇ La boussole est alors **déviée perpendiculairement** au fil
- ◇ L'effet **d'autant plus fort** que le courant est intense.
- ◇ Le sens de déviation **change** selon l'orientation du courant.

♥ Propriété I1.2 : Courant et champ magnétique

- ◇ Un fil parcouru par un courant génère un champ magnétique perpendiculaire à ce courant ;
- ◇ Le champ magnétique dépend de l'orientation et de l'intensité du courant

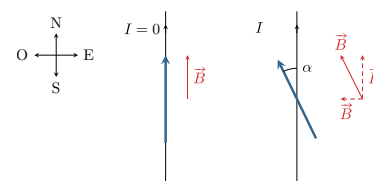


FIGURE I1.6

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).

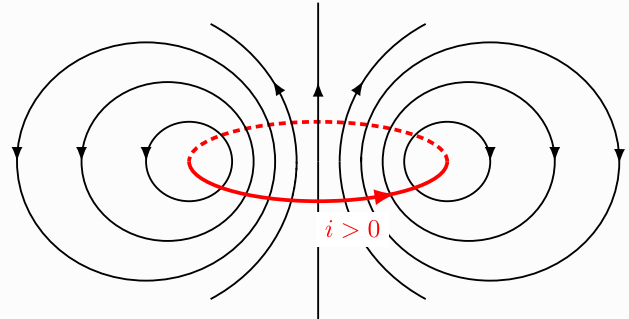
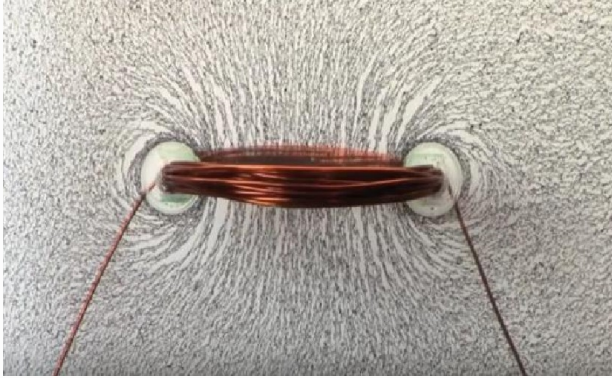


FIGURE I1.7 – Observation du champ créé par une bobine plate : limaille de fer et schématisation.

♥ Propriété I1.3 : Comparaison LdC aimant/bobine

Les lignes de champ d'une **bobine plate** s'apparentent à celles d'un **aimant droit**.

II/B) 2 Solénoïde

Définition I1.5 : Solénoïde

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

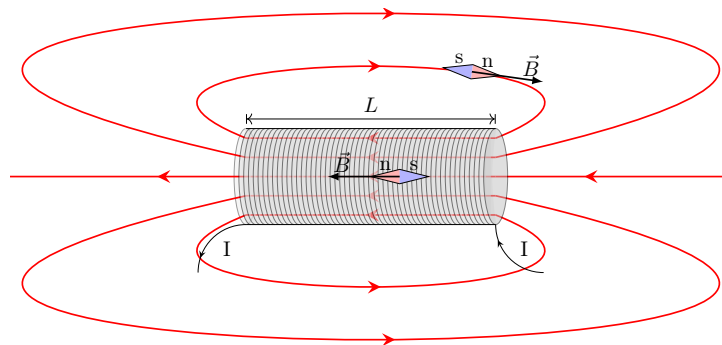


FIGURE I1.8 – Photo et représentation d'un solénoïde avec lignes de champ.

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

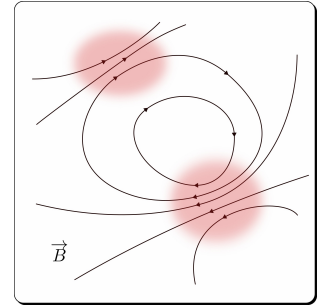
III/A Lire une intensité sur une carte

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** $\equiv$ champ intense ;
- ◇ **éloignées** $\equiv$ champ moins intense ;
- ◇ **parallèles** $\equiv$ champ uniforme.



♥ 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**.

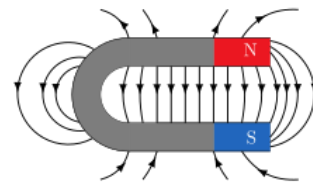
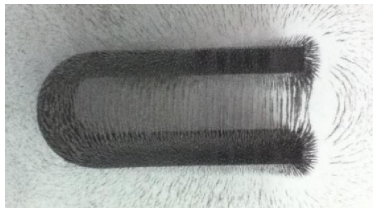
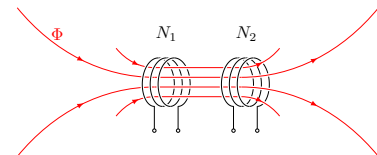


FIGURE I1.9 – Observation du champ créé par un aimant en U : limaille de fer et schématisation.

- 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

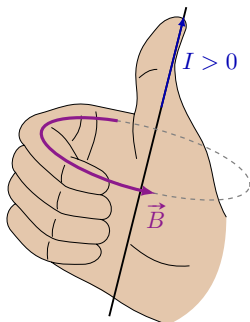


FIGURE I1.10 – Champ créé par un fil.

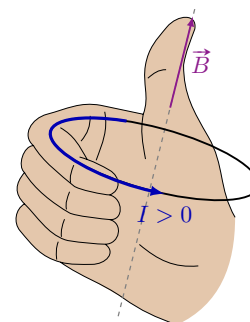


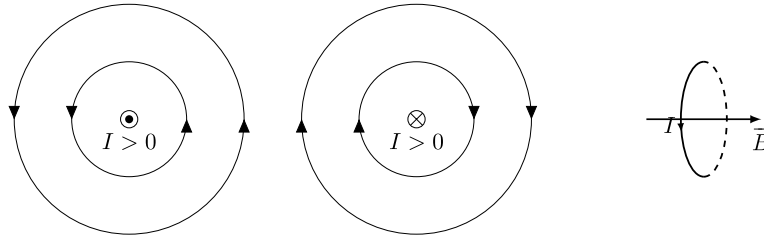
FIGURE I1.11 – Champ créé par une bobine.



♥ 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 :

$$\|\vec{B}\| = \mu_0 \frac{i(t)}{L}$$

- ◇ $i(t)$ 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

$$\vec{B} = \mu_0 n i(t) \vec{u}_z$$

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

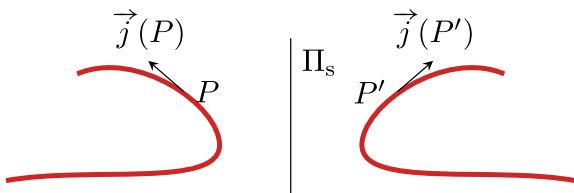
♥ Définition I1.6 : Plans d'(anti)-symétrie d'une distribution

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** :

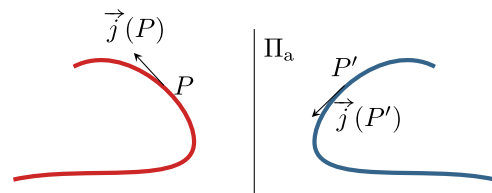
$$\vec{j}(P') = \text{sym}_{\Pi_s} \vec{j}(P) \Leftrightarrow \begin{cases} \vec{j}_{\parallel}(P) = +\vec{j}_{\parallel}(P') \\ \vec{j}_{\perp}(P) = -\vec{j}_{\perp}(P') \end{cases}$$



Plan d'antisymétrie Π_a

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

$$\vec{j}(P') = -\text{sym}_{\Pi_a} \vec{j}(P) \Leftrightarrow \begin{cases} \vec{j}_{\parallel}(P) = -\vec{j}_{\parallel}(P') \\ \vec{j}_{\perp}(P) = +\vec{j}_{\perp}(P') \end{cases}$$



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 :

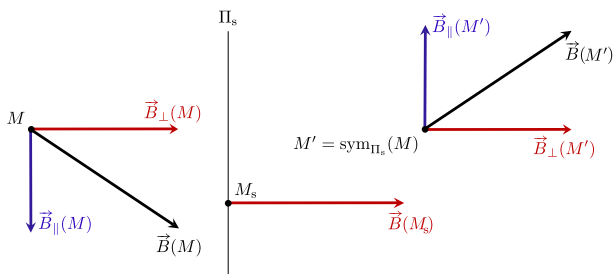
Important I1.2 : Symétries

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 :

$$\begin{aligned} \vec{B}(M') &= -\text{sym}_{\Pi_s}(\vec{B}(M)) \\ \Leftrightarrow \begin{cases} \vec{B}_{\parallel}(M) = -\vec{B}_{\parallel}(M') \\ \vec{B}_{\perp}(M) = +\vec{B}_{\perp}(M') \end{cases} \end{aligned}$$

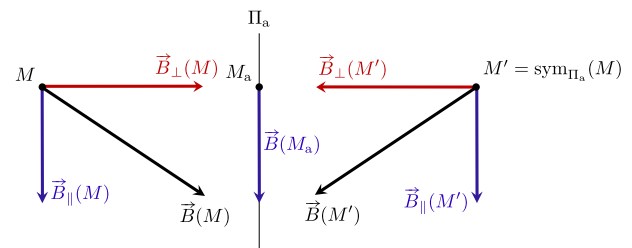


Soit $\forall M_s \in \Pi_s, \vec{B}(M_s) \perp \Pi_s$

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 :

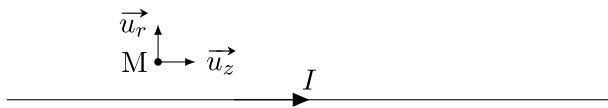
$$\begin{aligned} \vec{B}(M') &= \text{sym}_{\Pi_a}(\vec{B}(M)) \\ \Leftrightarrow \begin{cases} \vec{B}_{\parallel}(M) = +\vec{B}_{\parallel}(M') \\ \vec{B}_{\perp}(M) = -\vec{B}_{\perp}(M') \end{cases} \end{aligned}$$



Soit $\forall M_a \in \Pi_a, \vec{B}(M_a) \in \Pi_a$

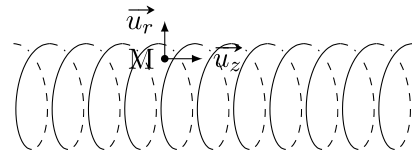
Application I1.2 : Symétrie de 2 systèmes

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



- ◇ $\Pi_a = (M, \vec{u}_r, \vec{u}_\theta)$ est plan de d'antisymétrie de la distribution (si on fait le miroir du courant il va dans le sens opposé), donc $\vec{B} \in \Pi_a$.
- ◇ $\Pi_s = (M, \vec{u}_r, \vec{u}_z)$ est plan de symétrie de la distribution : $\vec{B} \perp \Pi_s \Rightarrow \vec{B} \parallel \vec{u}_\theta$.

- 2) Soit un solénoïde avec des coordonnées cylindriques.



- ◇ $\Pi_s = (M, \vec{u}_r, \vec{u}_\theta)$ plan de symétrie : $\vec{B} \perp \Pi_s \Rightarrow \vec{B} \parallel \vec{u}_z$.

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

Le champ $\vec{B}$ possède les mêmes **invariances** que la distribution de courant

♥ 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) Pour un fil infini par exemple, le translater selon z ne change pas la distribution. Il n'y a donc aucune raison que $\vec{B}$ dépende de z .
- 2) De la même manière, pour tout fil parcouru par un courant, on a invariance de la distribution par rotation selon θ : $\vec{B}$ ne saurait dépendre de θ .

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

$$\vec{B}(r, \theta, z)$$

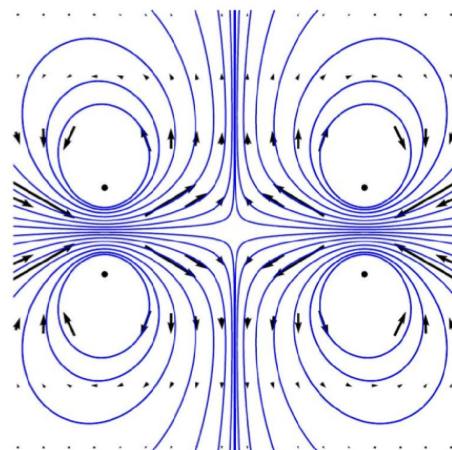
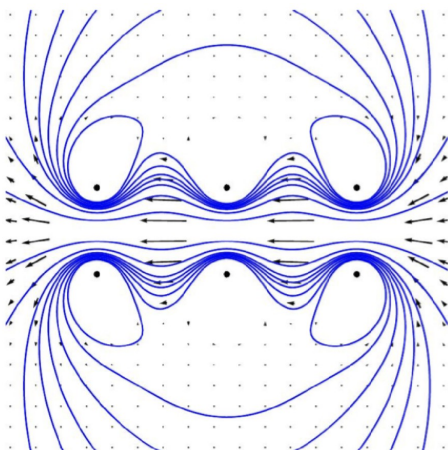
Si on ajoute l'étude des symétries, on a que $\vec{B} \parallel \vec{u}_\theta$. Tout combiné, on a donc

$$\vec{B}(M) = B(r)\vec{u}_\theta$$

♥ 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

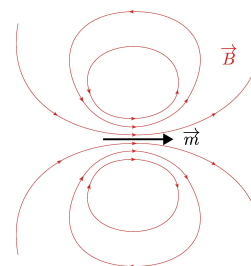
- | | |
|--------------------------------------|---|
| 1] la position des sources | 2] le sens du courant circulant dans les spires |
| 3] les zones de champ fort et faible | 4] le cas échéant s'il existe une zone de l'espace où le champ magnétique est uniforme. |



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**.



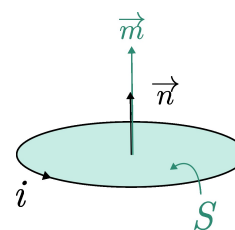
IV/A Boucle de courant

♥ 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

$$\vec{\mu} = i\vec{S} = i\pi R^2 \vec{n} \quad \text{en} \quad \boxed{\text{A}\cdot\text{m}^2}$$



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

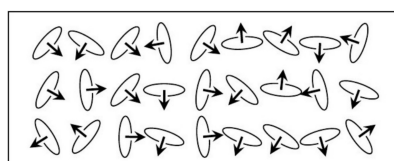
IV/B Cas des aimants

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 :

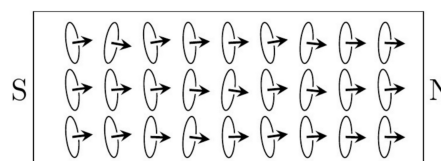


- ◇ **Moment magnétique orbital** dû au mouvement des électrons autour d'un noyau atomique, dessinant une boucle de courant auquel on associe un moment magnétique ;
- ◇ **Moment magnétique de spin** propriété intrinsèque des particules élémentaires. Elle n'a **pas d'équivalent classique**.

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).