

Champs magnétiques



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	5
II/A Aimant droit	5
II/B Champs magnétiques créés par des courants	5
III Intensité du champ magnétique	7
III/A Lire une intensité sur une carte	7
III/B Dispositifs créant un champ uniforme	7
III/C Lien entre courant et champ magnétique	8
IV Le moment magnétique	12
IV/A Boucle de courant	12
IV/B Cas des aimants	12



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

- ☐ Cartes et lignes de champ 4
- ☐ Boussole 4
- ☐ Champ magnétique 4
- ☐ Solénoïde 6
- ☐ Plans d'(anti)-symétrie de distrib. 9
- ☐ Moment magnétique 12

⚙️ Propriétés

- ☐ Géométrie des lignes de champ . . 5
- ☐ Comparaison LdC aimant/bobine 6
- ☐ Intensité et lignes de champ . . . 7
- ☐ Relation courant-champ 9
- ☐ Moment magnétique d'une spire . 12

✍️ Applications

- ☐ Exercice bilan sur lignes de champ 11

💡 Interprétations

- ☐ Analogie magnéto-mécanique . . . 8

🧮 Ordres de grandeur

- ☐ Intensité du champ magnétique . 7
- ☐ Moment magnétique d'un aimant 12

♥️ Points importants

- ☐ Règles de la main droite 8
- ☐ Symétries 10
- ☐ Invariances 11

⚠️ Erreurs communes

- ☐ Différence invariance/symétrie . . 11
-

I Introduction

I/A Notion de champ en physique

La notion de champ est omniprésente en physique.

Définition 1.1 : Champ

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

- ◇ **Scalaire** : la grandeur est un scalaire (température, pression...). On l'écrit $X(M,t)$;
- ◇ **Vectoriel** : la grandeur physique est un vecteur (force, vitesse...). On l'écrit $\vec{X}(M,t)$;
- ◇ **Stationnaire** : la grandeur physique ne **dépend pas du temps** : $X(M,t) = X(M)$;
- ◇ **Uniforme** : la grandeur ne **dépend pas de la position** : $X(M,t) = X(t)$.

Exemple 1.1 : 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.

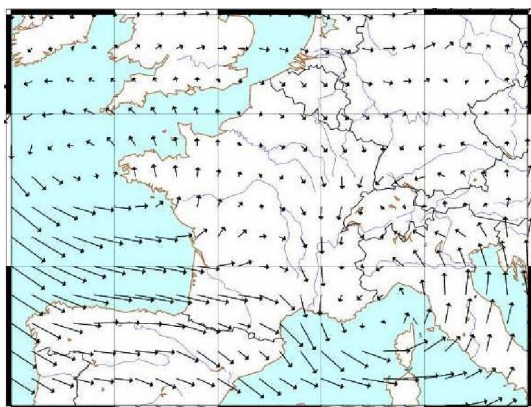


FIGURE 1.1 – Champ vectoriel du vent.

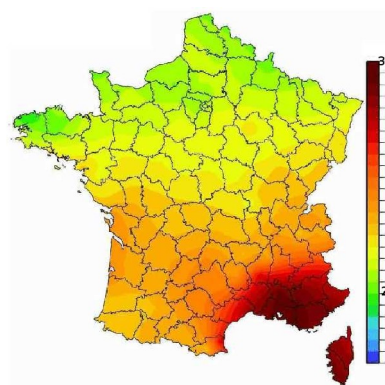
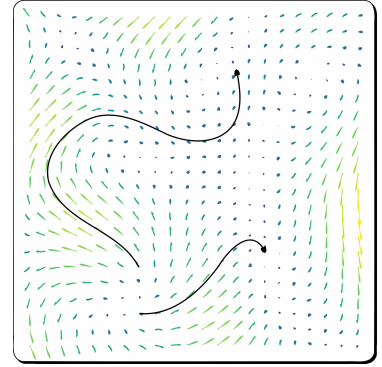


FIGURE 1.2 – Champ scalaire de la température.

♥ Définition 1.2 : 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.



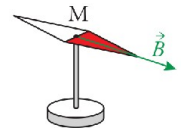
I/B Interaction entre aimants

Observations expérimentales

TABLEAU 1.1 – Interactions entre aimants

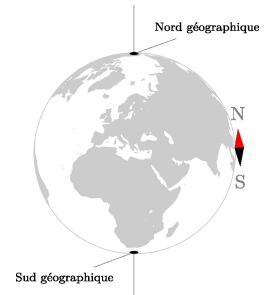
Situation A	Situation B	Situation C

- ◇ 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 1.3 : 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 1.4 : 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

Pour visualiser un champ magnétique d'un aimant, on peut utiliser de la limaille de fer. Les grains de limaille, de formes allongées, se transforment en petits aimants sous l'action du champ magnétique ; ils se comportent ainsi comme de petits boussoles qui s'orientent parallèlement au champ magnétique. On constate que les grains de limaille forment des courbes particulières allant d'un pôle de l'aimant vers l'autre, voir Figure 1.3.

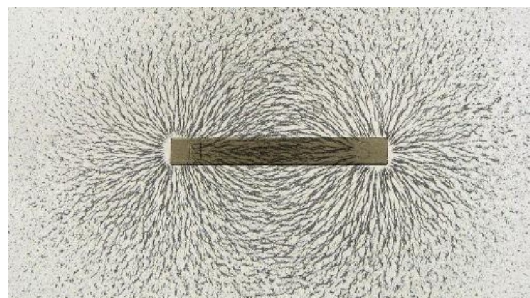


FIGURE 1.3 – Observation du champ magnétique d'un aimant au travers de son action sur l'orientation de grains de limaille de fer.

On en tire l'observation suivante :

♥ Propriété 1.1 : 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.

Schématiquement, on les représente de la manière suivante :

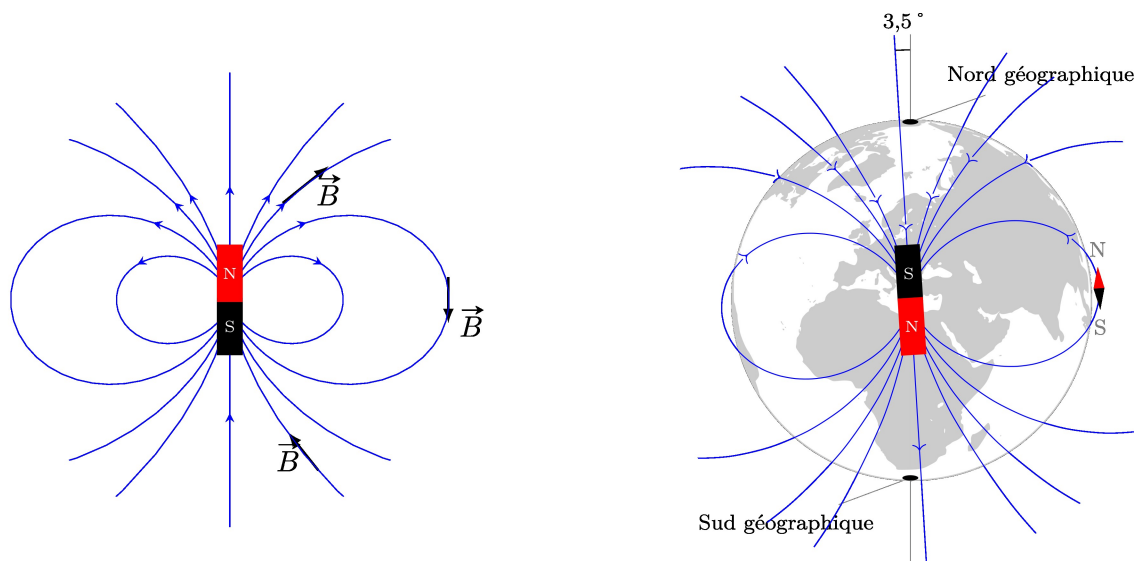


FIGURE 1.4 – Schématisation des lignes de champ dans un aimant droit, et schématisation du champ magnétique de la Terre comme celui d'un aimant droit. Une boussole à la surface de la Terre s'aligne sur le **pôle Sud magnétique** de la Terre, qui est proche du Nord géographique.

La Terre se comporte alors comme un gigantesque aimant. Son Sud magnétique se situe au nord géographique, de sorte à ce que les nords magnétiques des boussoles s'orientent vers le nord géographique.

II/B Champs magnétiques créés par des courants

En 1820, ØRSTED découvre qu'un **fil parcouru par un courant dévie une aiguille aimantée** : c'est la première preuve historique qu'un courant électrique crée un champ magnétique. De plus, en changeant le sens du courant, on change le sens de l'aiguille. Regardons différentes manières de réaliser cette expérience :

II/B) 1 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).

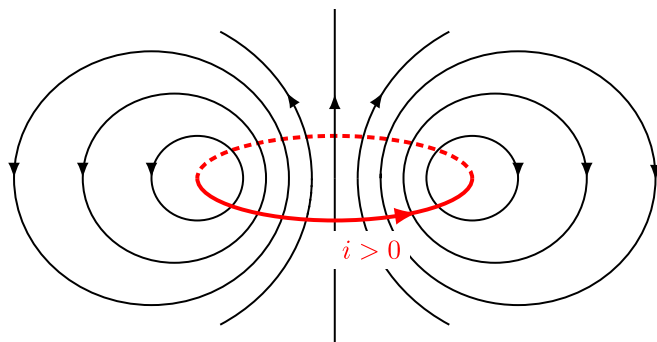
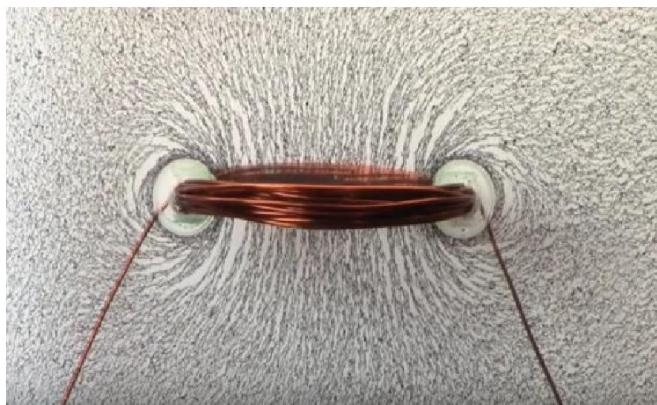


FIGURE 1.5 – Observation du champ créé par une bobine plate : limaille de fer et schématisation.

On observe alors la similitude suivante :

♥ Propriété 1.2 : 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 1.5 : Solénoïde

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

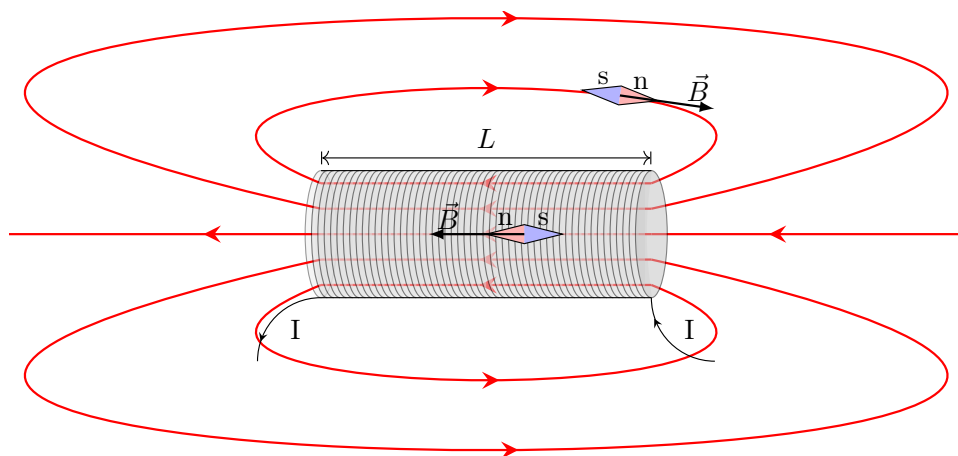


FIGURE 1.6 – Photo et représentation d'un solénoïde avec lignes de champ.

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

Expérience Plus la boussole est proche de l'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).



♥ Ordre de grandeur 1.1 : 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/A Lire une intensité sur une carte

Observation En reprenant l'exemple précédent du solénoïde, on remarque qu'une aiguille s'alignera **rapidement** si elle est **proche du solénoïde**, voire à l'intérieur, mais de plus en plus lentement quand on s'en éloigne. On a donc les deux observations suivantes en **augmentant la distance** à la bobine :

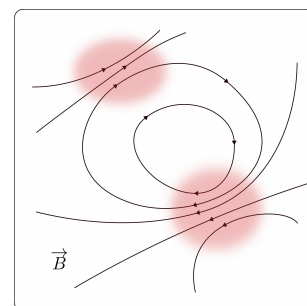
- ◇ les lignes de champ s'**écartent** les unes des autres ;
- ◇ l'intensité du champ **décroît**.

Ces deux phénomènes sont tout à fait liés, et on a

♥ Propriété 1.3 : 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** \Leftrightarrow champ intense ;
- ◇ **éloignées** \Leftrightarrow champ moins intense ;
- ◇ **parallèles** \Leftrightarrow champ uniforme.



III/B Dispositifs créant un champ uniforme

On a trois manières aisées de créer un champ uniforme :

- 1) **Dans un solénoïde**, les lignes de champ sont parallèles ;
- 2) Entre les deux pôles d'un **aimant en U**, l'expérience avec la limaille de fer montre que le champ est uniforme ;

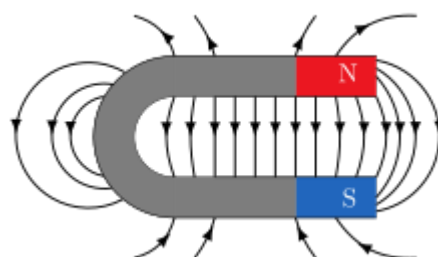
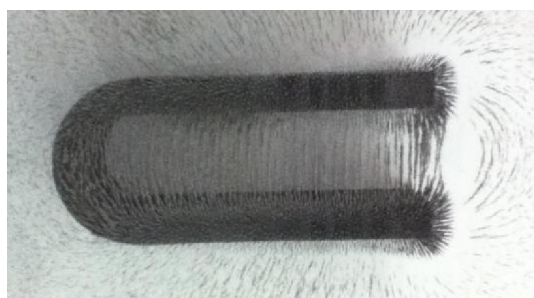


FIGURE 1.7 – Observation du champ créé par un aimant en U : limaille de fer et schématisation.

- 3) On peut également créer un champ magnétique uniforme avec deux bobines plates dans une configuration particulière : deux **bobines de rayon R et disposées à une distance R l'une de l'autre**, si elles sont parcourues par la même intensité, donnent un champ magnétique uniforme entre elles. On appelle cet ensemble une **bobine de HELMOLTZ** ; voir Figure 1.8. Vous pourrez pour cela manipuler une animation disponible en ligne¹.

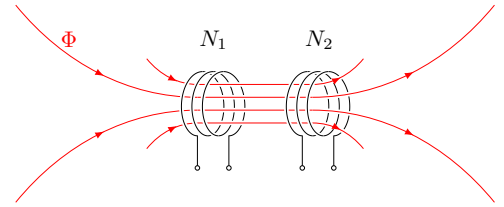


FIGURE 1.8 – Bobine de HELMOLTZ, échelle non respectée.

III/C Lien entre courant et champ magnétique

III/C) 1 Direction du champ magnétique

♥ Important 1.1 : Règles de la main droite

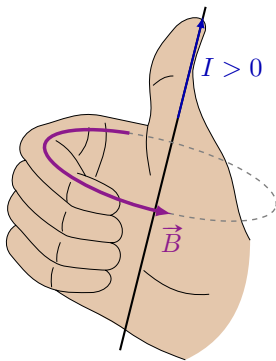


FIGURE 1.9 – Pour un champ créé par un fil : pouce sur le courant, doigts selon \vec{B} .

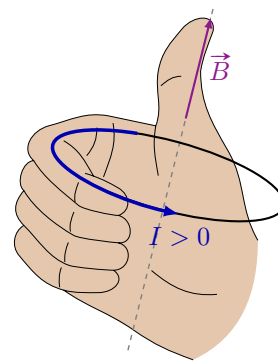
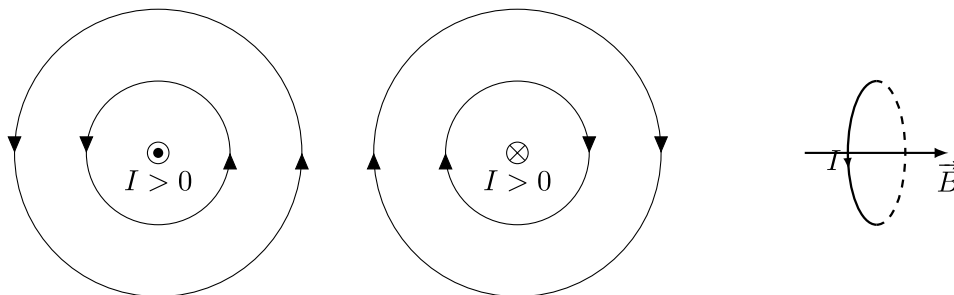


FIGURE 1.10 – Pour un champ créé par une bobine : pouce sur \vec{B} , doigts selon le courant.

♥ Interprétation 1.1 : 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 1.1 : Sens du courant et du champ



1. www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Elec/Champs/Helmholtz_FJ.php

III/C) 2 Proportionnalité

♥ Propriété 1.4 : 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

Les situations qu'on a étudiées jusque-là ont toutes fait preuve d'une certaine symétrie, et ce n'est pas un hasard.

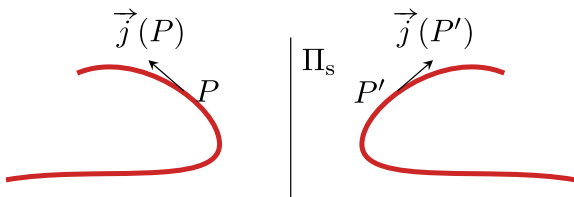
♥ Définition 1.6 : Plans d'(anti)-symétrie d'une distribution

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

Plan de symétrie Π_s

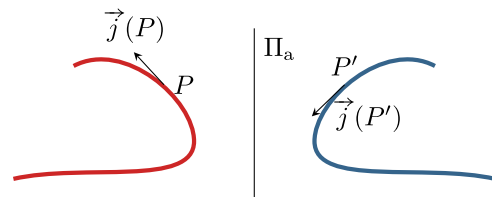
Les courants en tous **points P et P' symétriques** par rapport à Π_s sont **eux-mêmes symétriques** :

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

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 NOETHER², démontré en 1915.

Dans le cas du champ magnétique, on obtient les résultats suivants :

2. 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 ».

♥ Important 1.2 : Symétries

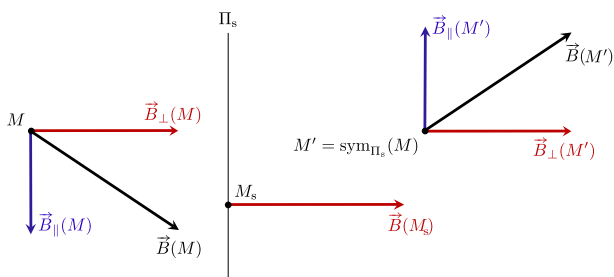
Soit M un point, Π_s un plan de symétrie de la distribution, et Π_a un plan d'**antisymétrie**. Pour le champ \vec{B} , on obtient :

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 :

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

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



On retiendra

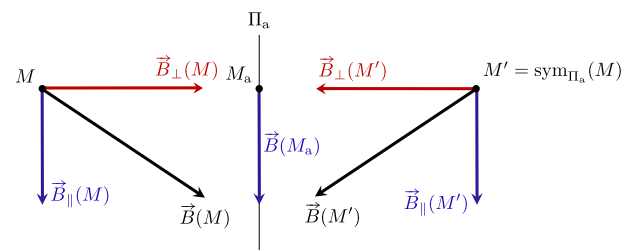
$$\forall M_s \in \Pi_s, \quad \vec{B}(M_s) \perp \Pi_s$$

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 :

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

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

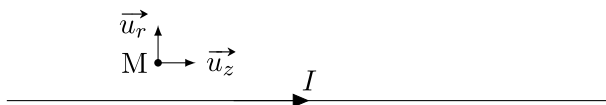


On retiendra

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

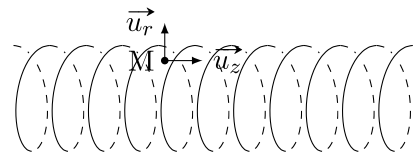
Application 1.2 : Symétrie distribution/champ

- 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** : $\vec{B} \perp \Pi_s \Rightarrow \vec{B} \parallel \vec{u}_z$.

III/C) 4 Invariances de la distribution de courants

♥ Important 1.3 : Invariances

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

♥ Attention 1.1 : 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 1.3 : Invariances distribution/champ 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

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

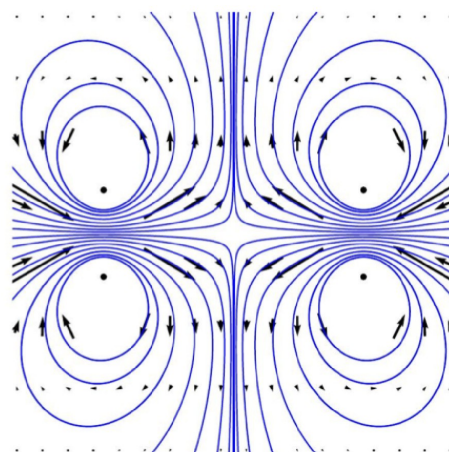
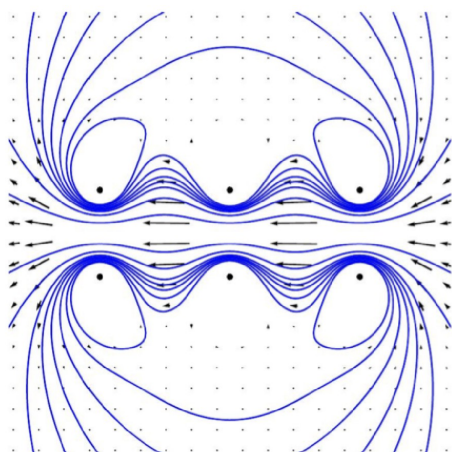
Si on ajoute l'étude des symétries, on a que $\vec{B} \parallel \vec{u}_\theta$. Tout combiné, on a donc

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

♥ Application 1.4 : 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

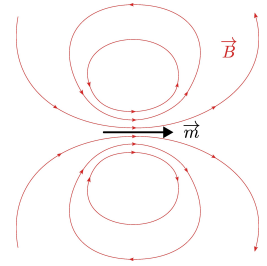
- | | |
|-------------------------------------|--|
| 1 la position des sources | 2 le sens du courant circulant dans les spires |
| 3 les zones de champ fort et faible | 4 le cas échéant s'il existe une zone de l'espace où le champ magnétique est uniforme. |



IV Le moment magnétique

♥ Définition 1.7 : 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**.



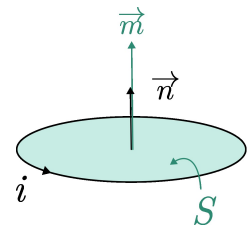
IV/A Boucle de courant

♥ Propriété 1.5 : 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

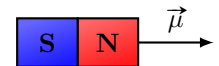
$$\vec{\mu} = i\vec{S} = i\pi R^2 \vec{n} \quad \text{en} \quad \text{A}\cdot\text{m}^2$$



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

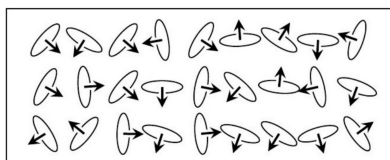
IV/B Cas des aimants

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 :

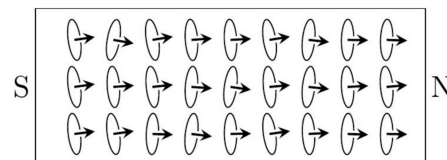


- ◇ **Moment magnétique orbital**, dû au mouvement des électrons autour d'un noyau atomique, dessinant une boucle de courant auquel on associe un moment magnétique ;
- ◇ **Moment magnétique de spin**, propriété intrinsèque des particules élémentaires. Elle n'a **pas d'équivalent classique**.

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 microscopiques³.



Milieu désordonné



Milieu ordonné présentant des pôles

♥ Ordre de grandeur 1.2 : 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 $\approx 8 \times 10^{22} \text{ A}\cdot\text{m}^2$.

3. Pour plus de détails, voir <https://www.youtube.com/watch?v=hFA0XdXZ5TM>.