

Champs magnétiques

I Introduction

A Notion de champ en physique

La notion de champ est omniprésente en physique.

Définition

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

- ◇ Lorsque la grandeur physique est un scalaire (température, pression...), on parle de **champ scalaire** $X(M,t)$;
- ◇ Lorsqu'elle est un vecteur (force, vitesse...), on parle de **champ vectoriel** $\vec{X}(M,t)$.
- ◇ Lorsqu'elle ne dépend pas du temps, le champ est **stationnaire** : $X(M,t) = X(M)$;
- ◇ Lorsque la valeur ne dépend pas de la position dans l'espace, le champ est **uniforme** : $X(M,t) = X(t)$.

Exemples

- ◇ 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 $z(x,y)$ est définie.
- ◇ On peut définir des champs 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 gravitationnel $\vec{F}(x,y,z)$ dans tout l'espace, qui point toujours vers le centre de la Terre.

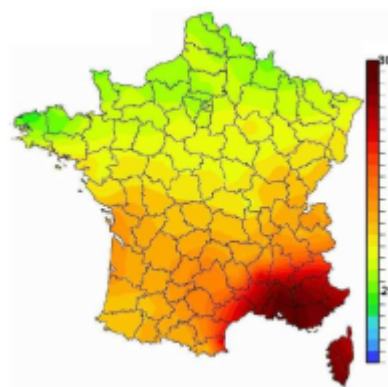
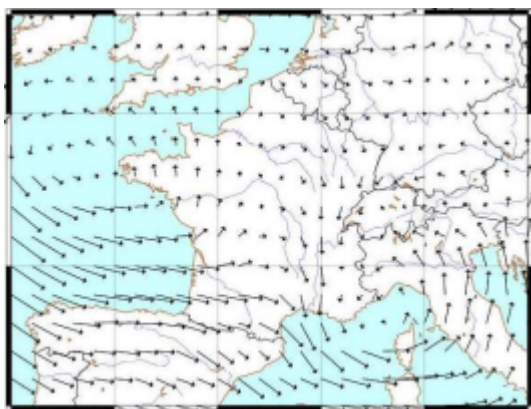


FIGURE 1.1 – Champ vectoriel du vent en France. **FIGURE 1.2** – Champ scalaire de la température en France.

B Interaction entre aimants

Observations expérimentales

- ◇ 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) ;
- ◇ Loin de toute perturbation, une aiguille s'oriente toujours sensiblement dans la direction du sud vers le nord géographique.

Boussole

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

Pour quantifier ces effets, on va introduire la notion de champ magnétique.

C Le vecteur champ magnétique

La direction de l'aiguille aimantée en un point indique la direction du champ magnétique.

Définition

Le **champ magnétique** est caractérisé par un **vecteur**, noté en général \vec{B} , tel que :

- ◇ sa direction est 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

A Aimant droit

Un aimant possède un pôle nord **et** un pôle sud magnétique. Deux pôles de même nature se repoussent, deux pôles de natures opposées se repoussent. Ceci est dû à leur interaction magnétique, que l'on expliquera plus tard. Pour le moment, nous nous contenterons de **représenter** le champ créé par un aimant. Pour cela, plutôt que de représenter des flèches à chaque point de l'espace autour d'un aimant (ce qui serait lourd), on utilise une représentation plus légère : les lignes de champ.

Définition

Les **lignes de champ** sont des courbes **orientées** tangentes en tout point au champ magnétique. Elles donnent la direction **et le sens** du champ magnétique en tout point.

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. Ainsi, on observe la chose suivante :

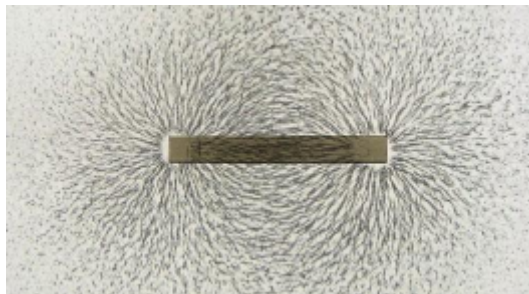


FIGURE 1.3 – Observation du champ magnétique d'un aimant au travers de son action sur l'orientation de grains de limaille de fer.

Propriété

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 :

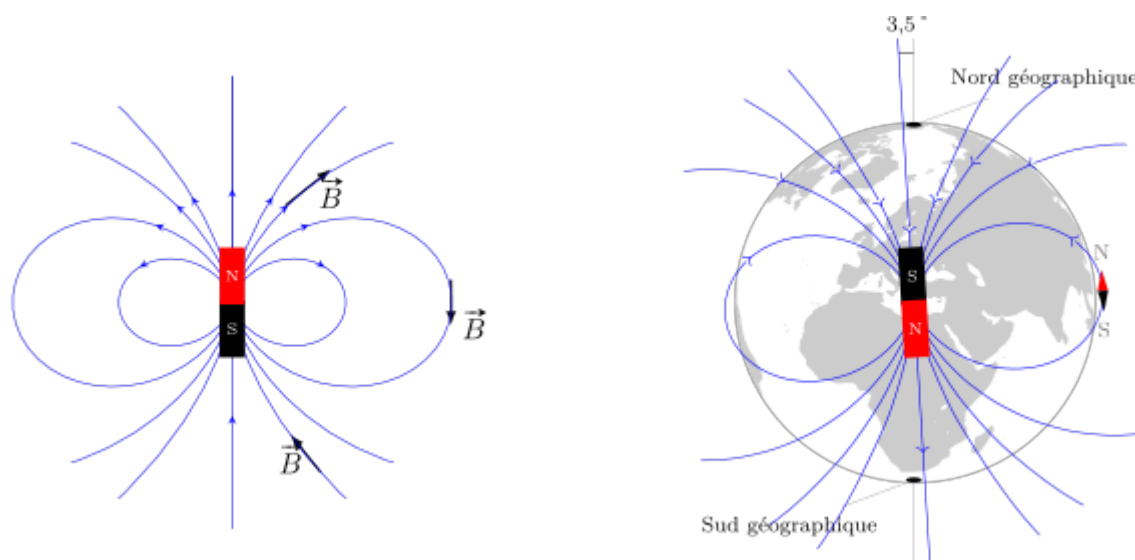


FIGURE 1.4 – Schématisation des lignes de champ dans un aimant droit, et schématisation du champ magnétique de la Terre comme celui d'un aimant droit. Une boussole à la surface de la Terre s'aligne sur le **pôle Sud magnétique** de la Terre, qui est proche du Nord géographique.

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.

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).

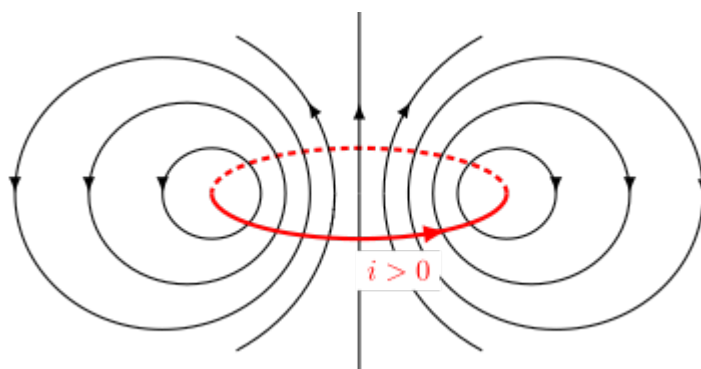
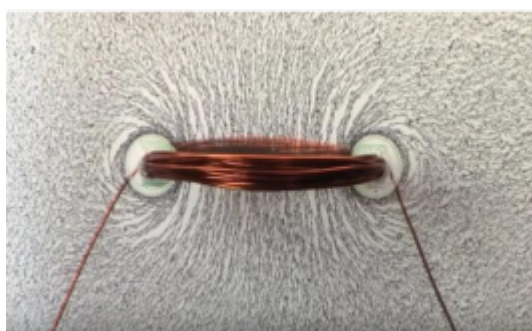


FIGURE 1.5 – Observation du champ créé par une bobine plate : limaille de fer et schématisation.

Ainsi,

Comparaison aimant

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

II.B.2 Solénoïde

Définition

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



FIGURE 1.6 – Photo d'un solénoïde.

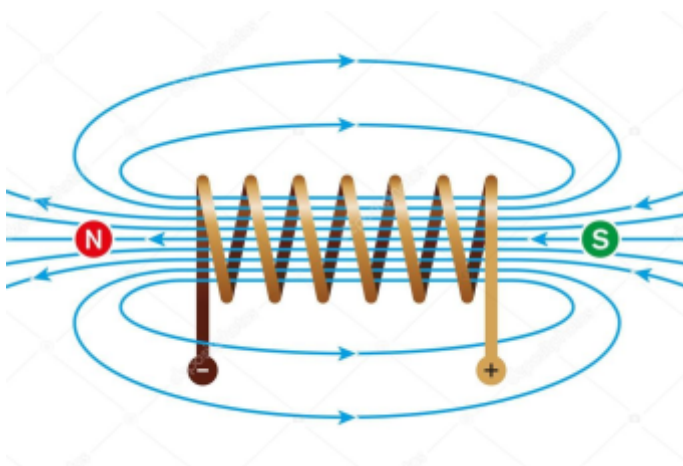


FIGURE 1.7 – Représentation d'un solénoïde avec lignes de champ.

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).

OdGrangeurs

- ◇ champ magnétique terrestre $\approx 5 \times 10^{-5} \text{ T}$;
- ◇ champ créé par un aimant $\approx (0,01 ; 0,5) \text{ T}$;
- ◇ champ créé par un électroaimant $\approx (1 ; 10) \text{ T}$;
- ◇ champ créé par un IRM $\approx 10 \text{ T}$;

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. Ainsi,

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

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



Propriété

- ◇ Lignes de champ **proches** \Leftrightarrow champ intense ;
- ◇ Lignes de champ **éloignées** \Leftrightarrow champ moins intense ;
- ◇ Lignes de champ **parallèles** \Leftrightarrow champ uniforme.

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, c'est une première façon ;
- 2) Entre les deux pôles d'un aimant en U, l'expérience avec la limaille de fer montre que le champ est uniforme (voir Figures 1.8 et 1.9).

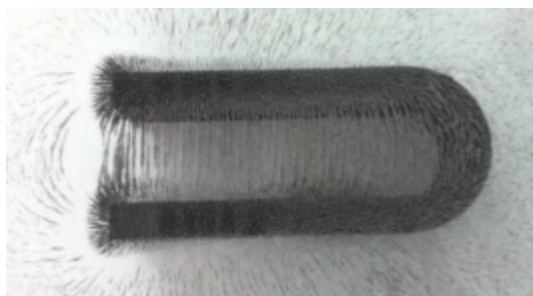


FIGURE 1.8 – Observation du champ magnétique dans un aimant en U par limaille de fer.

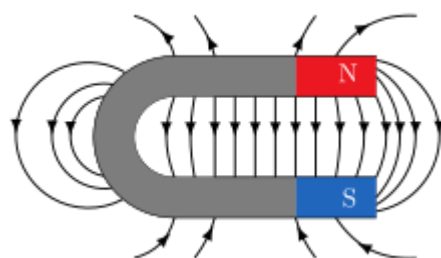


FIGURE 1.9 – Schématisation du champ magnétique dans un aimant en U.

- 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 1.10. Vous pourrez pour cela manipuler une animation disponible en ligne ¹.

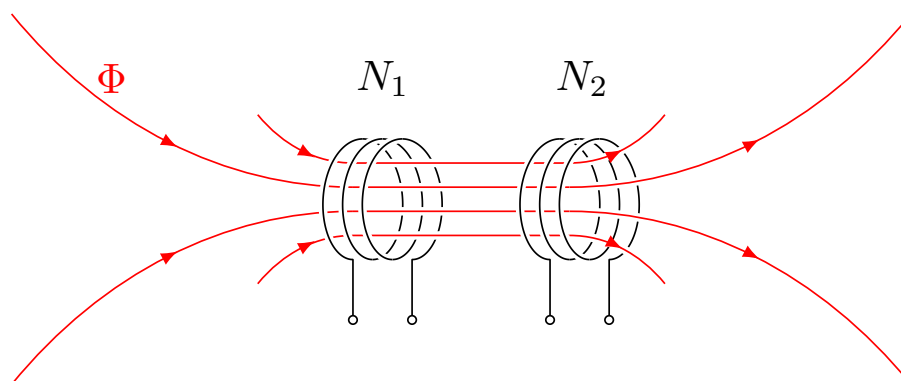


FIGURE 1.10 – Représentation des lignes de champ d'une bobine de HELMOLTZ. Le schéma n'est pas exactement à l'échelle : il faut que la distance entre les bobines soit égale à leur rayon.

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

C Lien entre courant et champ magnétique

III.C.1 Direction du champ magnétique

Règles de la main droite

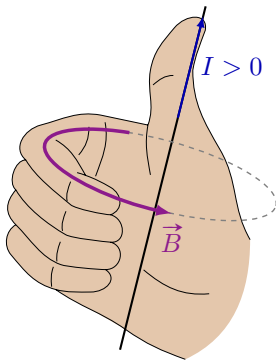


FIGURE 1.11 – Pour un champ créé par un fil : pouce sur le courant, doigts selon \vec{B} .

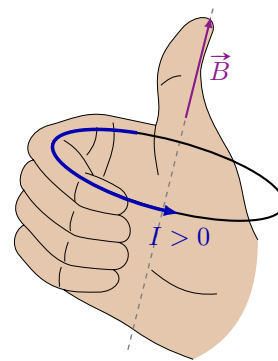
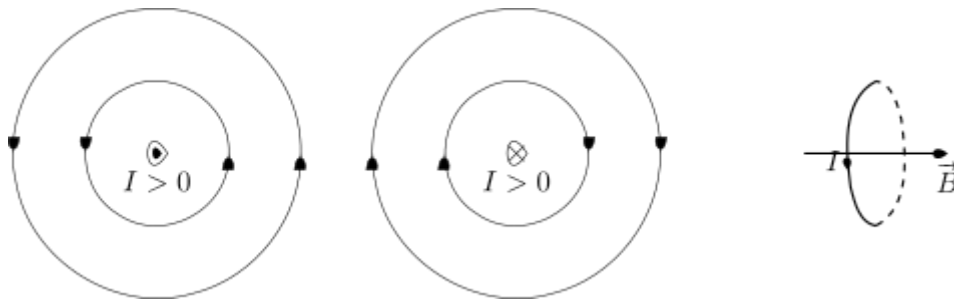


FIGURE 1.12 – Pour un champ créé par une bobine : pouce sur \vec{B} , doigts selon le courant.

Application



III.C.2 Proportionnalité

Dans le vide, le champ magnétique créé par un courant i est de l'ordre de :

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

avec :

- ◇ $i(t)$ 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.

Par exemple, à l'intérieur d'un solénoïde où le champ est uniforme, on a

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

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

III.C.3 Symétries de la distribution de courant

Les situations qu'on a étudiées jusque-là ont toutes fait preuve d'une certaine symétrie, et ce n'est pas un hasard. L'étude des symétries est d'ailleurs toute une science en soit, qui a mené à une des plus grandes découvertes scientifiques du monde : le théorème de NOETHER², démontré en 1915. Contentons-nous de géométrie pour le moment...

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 ».

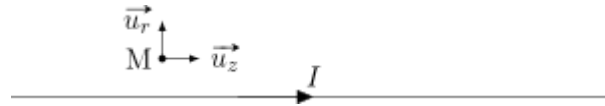
Symétries

Soit M un point, \mathcal{P} un plan de symétrie de la distribution, et \mathcal{P}' un plan d'**antisymétrie**. Alors :

- ◊ $M \in \mathcal{P} \Leftrightarrow \vec{B}(M) \perp \mathcal{P}$;
- ◊ $M \in \mathcal{P}' \Leftrightarrow \vec{B}(M) \in \mathcal{P}'$.

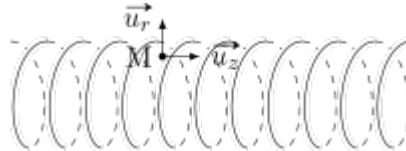
Exemples

1) Soit un fil doté de coordonnées cylindriques.



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

2) Soit un solénoïde avec des coordonnées cylindriques.



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

III.C.4

Invariances de la distribution de courants

Invariances

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

Attention : il ne faut pas confondre symétrie et invariance !

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**.

Exemple

- 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

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

D Exercice bilan

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

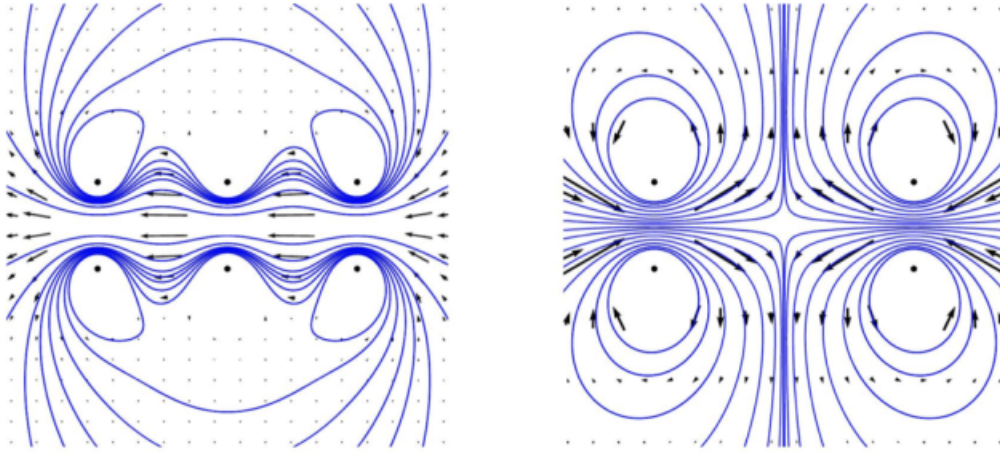


FIGURE 1.13 – Représentation des lignes de champ pour différentes situations avec des spires de courant.

IV Le moment magnétique

A Boucle de courant

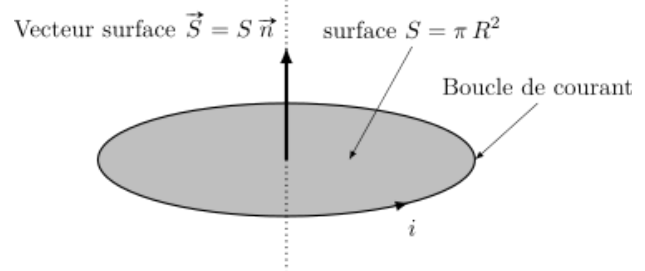
Définition

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

$$\vec{\mu} = i\vec{S} = i\pi R^2 \vec{n}$$

avec $\vec{S} = \pi R^2 \vec{n}$ le vecteur surface, en m^2 : le moment magnétique s'exprime donc en $\boxed{\text{A} \cdot \text{m}^2}$.



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

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. Ce sont ensuite des effets à grande échelle qui permettent l'existence d'un champ à l'échelle d'un solide entier.

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 $\approx 8 \times 10^{22} \text{ A} \cdot \text{m}^2$.