

XXI-1 Le champ magnétique

Pour avoir dès notre plus jeune âge manipulé les aimants qui équipent les jouets, nous connaissons tous leurs propriétés : deux aimants peuvent s'attirer ou se repousser selon leur orientation relative. Cette interaction à distance peut être modélisée en faisant intervenir la notion de champ magnétique.

Le champ magnétique peut être mis en évidence à l'aide d'un petit aimant en forme d'aiguille (aiguille aimantée), libre de prendre toutes les orientations possibles. En particulier, loin de tout aimant et de toute masse ferreuse perturbatrice, une aiguille aimantée libre de pivoter autour d'un axe vertical s'aligne toujours sensiblement sur la direction sud-nord géographique : c'est le principe de la boussole.

I - Sources et cartes du champ magnétique

I-1) Champ magnétique

a) Boussole

Une boussole est une aiguille aimantée libre de s'orienter. On convient d'appeler pôle nord magnétique de la boussole l'extrémité qui pointe vers le nord géographique et pôle sud magnétique l'extrémité qui pointe vers le sud géographique.

b) Champ magnétique

Cette définition des pôles magnétiques est une pure convention. En un point donné de l'espace, une boussole s'oriente sous l'influence du champ magnétique terrestre. C'est donc qu'en tout point, le champ magnétique est caractérisé par une direction et un sens. **Le champ magnétique est donc un champ vectoriel :**

- **sa direction est indiquée par une boussole ;**

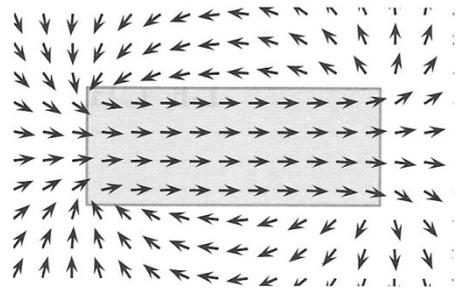
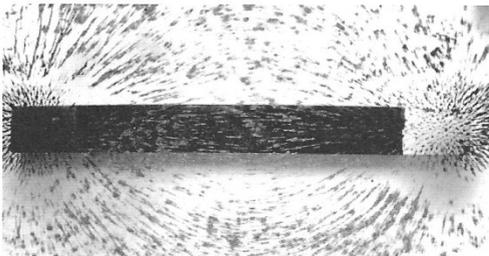
- **son sens est défini par convention par rapport à la boussole.**

Une aiguille aimantée placée en un point s'aligne sur le vecteur champ magnétique qui règne en ce point. Le champ magnétique est dirigé du pôle sud vers le pôle nord de l'aiguille.

Plusieurs dispositifs classiques permettent de créer des champs magnétiques de géométrie simple. Pour chaque dispositif, on peut visualiser le champ magnétique créé à l'aide de limaille de fer : chaque grain de limaille se comporte comme une petite boussole et s'oriente dans le champ, matérialisant ainsi le spectre magnétique du dispositif.

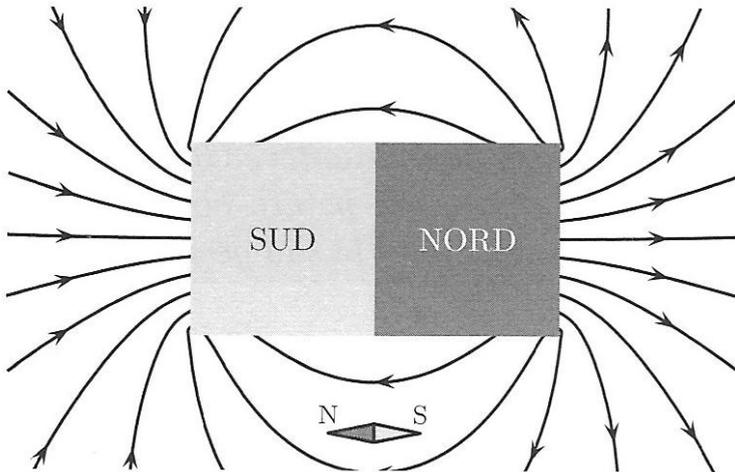
c) Aimant droit

L'aimant droit, ou barreau aimanté, génère un champ magnétique dont la carte est donnée sur la figure suivante. On peut également donner les lignes de champ magnétique, définies comme des courbes orientées tangentes en chacun de leur point au champ magnétique local.



Spectre magnétique d'un aimant droit. À gauche, de la limaille de fer déposée sur une plaque de verre posée sur un aimant droit permet de visualiser le spectre magnétique. À droite, carte du champ magnétique créé par un aimant droit : chaque flèche indique la direction du champ magnétique à l'endroit considéré.

Lignes de champ magnétique d'un aimant droit.



Tout aimant possède un pôle nord et un pôle sud magnétiques (l'un n'existe pas sans l'autre). Les interactions entre deux aimants obéissent à la loi suivante.

- **Deux pôles de même nature se repoussent.**
- **Deux pôles de natures distinctes s'attirent.**

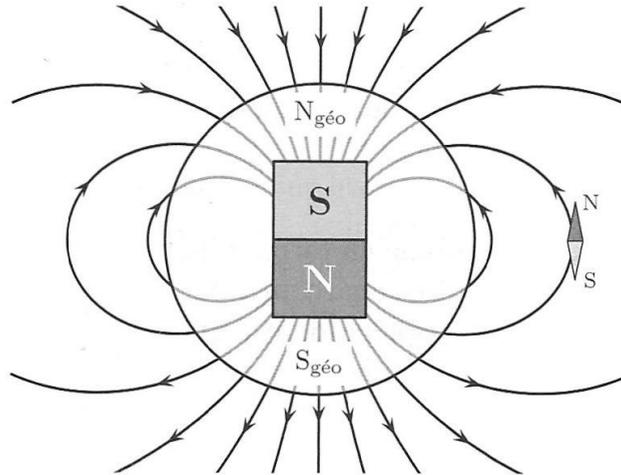
Cette loi d'interaction permet de placer correctement les pôles nord et sud de l'aimant droit de la figure à l'aide d'une boussole (qui est elle-même un aimant servant de référence). De cet exemple, on déduit le lien entre les pôles d'un aimant droit et l'orientation des lignes du champ qu'il génère.

d) Pôles magnétiques d'un aimant

Un aimant crée un champ magnétique tel que les lignes de champ sortent de l'aimant par le pôle nord et entrent dans l'aimant par le pôle sud.

Du point de vue du champ magnétique créé, la Terre est assimilable à un gros aimant droit. Le nord géographique de la Terre est un sud magnétique, et inversement.

Lignes du champ magnétique terrestre : La boussole s'aligne sur les lignes locales du champ magnétique terrestre. Le nord de la boussole pointe vers le nord géographique, qui est un pôle sud magnétique.

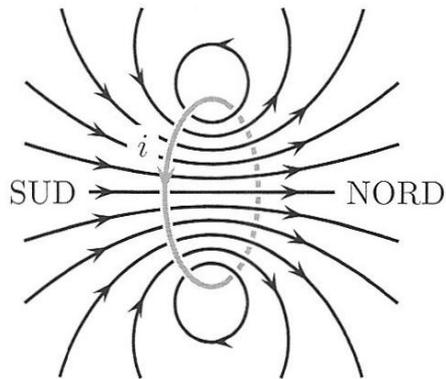
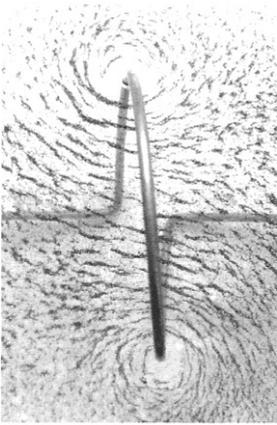


I-2) Champs magnétiques créés par des courants

a) Bobine plate

En 1820, le physicien danois Hans Christian Oersted montra expérimentalement qu'une boussole, à proximité d'un fil rectiligne parcouru par un courant, s'oriente perpendiculairement à ce fil. Ce fut la première preuve que le courant électrique crée un champ magnétique.

Une bobine plate, ou spire, est un fil électrique de forme circulaire. Si un courant parcourt ce fil, un champ magnétique est créé. On constate expérimentalement que les deux faces de la bobine jouent le même rôle que les pôles d'un aimant.



À gauche, spectre magnétique d'une bobine plate visualisé par de la limaille de fer. À droite, la spire est représentée en gris, en perspective, et les lignes de champ magnétique en noir. Elles entrent dans la spire par la face sud et en ressortent par la face nord.

b) Pôles d'une bobine plate

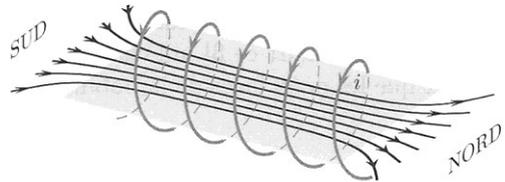
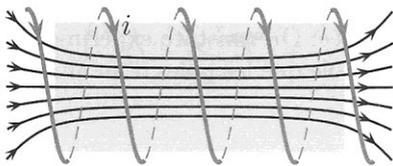
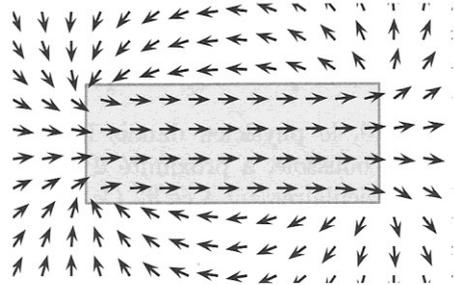
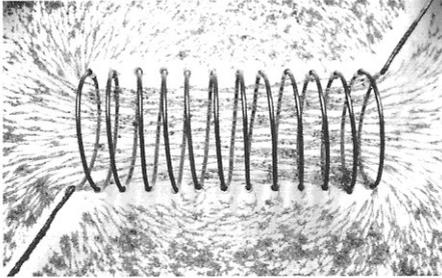
Les lignes de champ magnétique entrent par la face sud (pôle sud) d'une bobine et ressortent par la face nord (pôle nord).

Du fait de la présence de pôles, une bobine possède des propriétés magnétiques analogues à celles d'un aimant. Le pôle sud d'une bobine repousse le pôle sud d'une autre bobine ou d'un aimant, et attire le pôle nord d'une autre bobine ou d'un aimant.

c) Bobine longue ou solénoïde

En enroulant un fil sur un cylindre, on fabrique une bobine en forme d'hélice appelée solénoïde. Un champ magnétique est créé lorsque ce fil est parcouru par un courant. Le champ à l'intérieur du solénoïde est quasiment uniforme et parallèle à l'axe du solénoïde. En grec, « sôlên » signifie canal : le solénoïde est un tube qui « canalise » le champ magnétique. Comme pour toute bobine, les

lignes de champ entrent par la face sud et ressortent par la face nord.



Spectre magnétique d'un solénoïde. À l'intérieur du solénoïde, les lignes de champ magnétique sont quasiment parallèles à l'axe du solénoïde.

L'uniformité du champ dans le solénoïde est d'autant meilleure que le solénoïde est « long », c'est-à-dire que le rapport (sans dimension) de sa longueur sur son diamètre est grand.

II - Intensité du champ magnétique

II-1) Généralités

a) Unité

Qualitativement, un champ magnétique est intense si une boussole placée dans ce champ se stabilise immédiatement. C'est le cas d'une boussole près de laquelle on approche soudainement un gros aimant. Si on place la même boussole dans un champ magnétique peu intense, elle a tendance à osciller plusieurs fois

avant de se stabiliser dans la direction du champ. C'est le cas d'une boussole dans le champ magnétique terrestre.

- **L'unité SI de champ magnétique est le tesla (symbole T).**

L'unité SI de champ magnétique a été choisie en hommage à Nikola Tesla (1856-1943), ingénieur en électricité américain d'origine serbe.

b) Force de Laplace

Comme tout champ, le champ magnétique se mesure par ses effets. Son action sur les particules chargées a déjà été étudiée. Cet effet à l'échelle microscopique sur les particules se manifeste aussi à l'échelle macroscopique : **un fil électrique parcouru par un courant et plongé dans un champ magnétique extérieur subit une force, dite de Laplace, dont l'intensité est proportionnelle au champ magnétique** (les forces de Laplace seront étudiées au chapitre 21).

On peut donc mesurer un champ magnétique en mesurant une force de Laplace. Il apparaît également une légère tension électrique, appelée tension de Hall, entre les bords latéraux opposés de ce fil électrique. La tension de Hall, dont l'étude est hors programme, est proportionnelle au champ magnétique dans lequel le fil électrique est plongé, permettant ainsi une mesure de ce champ. De nos jours, les champs magnétiques sont mesurés avec des teslamètres à effet Hall. Les ordres de grandeur suivants sont à connaître.

c) Ordres de grandeur

Le tesla est souvent qualifié de « grosse unité » à cause des faibles ordres de grandeur numériques des champs magnétiques.

Composante horizontale du champ magnétique terrestre à la surface de la Terre	$5 \cdot 10^{-5} \text{ T}$
Champ à l'extrémité d'un aimant usuel	$5 \cdot 10^{-2}$ à $5 \cdot 10^{-1} \text{ T}$ selon le matériau
Appareil d'imagerie médicale à résonance magnétique	6 T

II-2) Lien entre intensité et cartes de champ magnétique

On constate expérimentalement deux phénomènes lorsqu'on s'éloigne de la source (aimant ou bobine) qui crée un champ magnétique :

- L'intensité du champ magnétique décroît ;
- Les lignes de champ magnétique s'écartent les unes des autres, comme le montrent les figures.

Ces deux faits sont liés et constituent une propriété fondamentale du champ magnétique qui sera détaillée en seconde année.

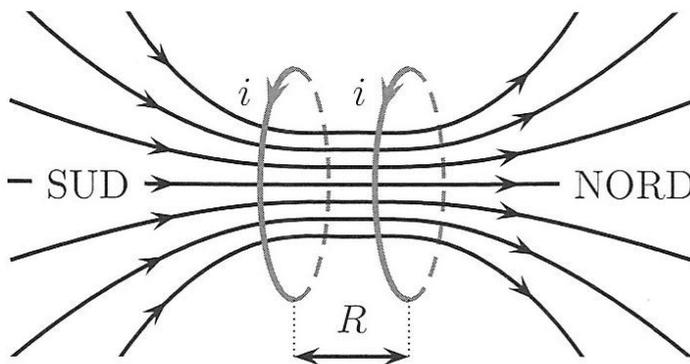
Deux lignes de champ voisines dans une zone où le champ est intense s'éloignent l'une de l'autre dans une zone où le champ décroît en intensité.

En conséquence, le champ magnétique est uniforme (direction et norme identiques en tout point) dans toute zone où les lignes de champ sont parallèles.

Le cœur d'un solénoïde long est donc une zone où le champ magnétique est uniforme.

On peut également générer un tel champ avec des bobines de Helmholtz. En plaçant deux bobines plates de même rayon R sur le même axe, à la distance R l'une de l'autre, et parcourues par des courants de même sens et même intensité, on obtient ; le dispositif des bobines de Helmholtz qui a la propriété de créer entre les bobines un champ magnétique quasiment uniforme. Ce dispositif est très utile pour les expériences nécessitant un champ uniforme, d'autant plus que la zone est facilement accessible.

Bobines de Helmholtz et lignes de champ magnétique. Le champ est quasi uniforme entre les bobines si la distance entre celles-ci est égale au rayon des bobines.



Un champ magnétique uniforme peut être obtenu à l'aide :

- De bobines de Helmholtz
- D'un solénoïde long.

II-3) Lien entre courant et champ magnétique

a) Direction et sens de \vec{B}

Le vecteur champ magnétique est usuellement noté \vec{B} .

La règle de la main droite est un moyen mnémotechnique simple pour déterminer le sens du champ magnétique créé par une bobine.

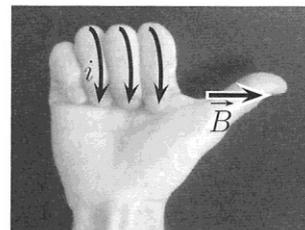
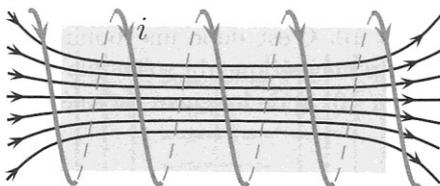
- Règle de la main droite

Le champ magnétique créé par une bobine est orienté relativement au courant par la règle de la main droite. En fermant le poing de la main droite et en gardant le pouce tendu, les doigts indiquent le sens du courant et le pouce indique le sens du champ qui en résulte.

b) Norme du champ magnétique

La norme du champ magnétique créé par une bobine obéit à la loi empirique suivante.

Dans le vide, l'intensité du champ magnétique créé par un circuit électrique est proportionnelle à l'intensité du courant dans ce circuit.



Règle de la main droite. En fermant la main droite, les doigts indiquent le sens du courant et le pouce indique le sens du champ magnétique résultant dans le solénoïde.

Remarque : Si un morceau de fer est à proximité du circuit, il peut perturber le champ magnétique et il n'y a plus nécessairement proportionnalité entre le champ magnétique et le courant. La loi de proportionnalité est donc a priori valable « dans le vide ».

Un exemple simple de champ magnétique est celui du solénoïde « infiniment long », c'est-à-dire dont la longueur est beaucoup plus grande que le diamètre. Le champ magnétique dans un tel solénoïde est uniforme (B est le même en tout point) et est donné par une expression simple.

À l'intérieur d'un solénoïde infini d'axe de direction Oz , comportant n spires par unité de longueur, et parcouru par un courant i , le champ magnétique est uniforme et vaut

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

La constante de proportionnalité μ_0 , nécessaire pour assurer l'homogénéité de l'expression, est appelée perméabilité magnétique du vide et vaut :

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{Hm}^{-1} \text{ exactement.}$$

Remarque :

Dans la relation $\vec{B} = \mu_0 n i \vec{u}_z$, le vecteur \vec{u}_z est unitaire. L'équation aux dimensions associée est donc, exprimée dans les unités SI,

$$[B] = [\mu_0] [n] [i] \Rightarrow T = \text{Hm}^{-1} \text{m}^{-1} \text{A} = \text{Hm}^{-2} \text{A}$$

Cette relation donne le lien entre les henrys, les teslas et les ampères.

Pour augmenter l'intensité du champ magnétique créé, on peut introduire un noyau de fer doux (fer sans impuretés) dans le solénoïde. Le champ magnétique est alors simplement multiplié par μ_r , la perméabilité relative (sans dimension) du fer doux, qui est de l'ordre de 10^3 (la valeur précise dépend du matériau). Cela permet d'atteindre des champs de l'ordre du tesla. Un solénoïde équipé d'un noyau de fer doux est un électroaimant, c'est-à-dire un aimant commandable par passage du courant.

Malgré l'usage des noyaux de fer, il est difficile de générer des champs de plus de quelques teslas. Générer un fort champ magnétique avec un solénoïde nécessiterait d'augmenter simultanément le nombre de spires et l'intensité du courant. Ces deux besoins sont antagonistes, car un fort courant nécessite de gros fils et rend le bobinage plus encombrant, réduisant le nombre de spires réalisable. On peut s'affranchir de ce problème en utilisant des fils supraconducteurs (de résistance électrique rigoureusement nulle), mais le comportement supraconducteur n'est atteint que pour de très basses températures et nécessite un gros système de refroidissement. L'autre problème majeur pour la réalisation de champs intenses est l'énormité des forces magnétiques mises en jeu. Elles ont tendance à étirer les spires vers l'extérieur, faisant littéralement exploser le solénoïde. Le record actuel est d'environ 45 T, avec un électroaimant spécial de 32 tonnes réalisé au National High Magnetic Field Laboratory (États-Unis). Pour résister aux énormes forces magnétiques, cet électroaimant est réalisé avec des blocs (et non des fils) de supraconducteur. Il fonctionne à basse température ($T = -271 \text{ °C}$).

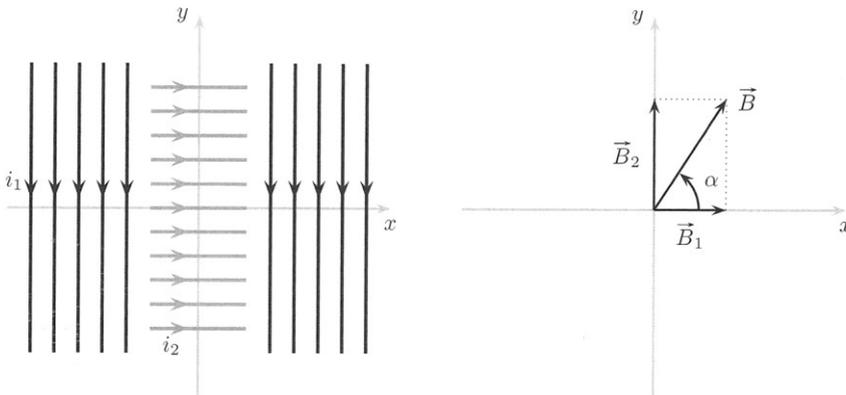
II-3) Principe de superposition des champs magnétiques

Le principe précédent énonce la proportionnalité entre l'intensité électrique dans un circuit et le champ magnétique créé par ce circuit. Mathématiquement, on dit qu'il y a une relation linéaire entre le champ et le courant. Cette notion de linéarité est étendue avec le principe de superposition des champs magnétiques dans le vide.

On fabrique un dispositif constitué de deux longs solénoïdes orthogonaux, le solénoïde 2 étant dans le solénoïde 1 (voir figure). Les deux solénoïdes ont le même nombre n de spires par unité de longueur.

Une boussole, placée à l'intersection des axes des deux solénoïdes, s'aligne sur le champ résultant. Expérimentalement, on constate que l'angle α repérant la boussole vérifie :

$$\tan \alpha = \frac{i_2}{i_1}$$



Mise en évidence du principe de superposition des champs magnétiques à l'aide de deux solénoïdes et d'une boussole. Le solénoïde 2 (en gris) est dans le solénoïde 1 (en noir). Le solénoïde noir n'a pas été représenté en entier pour des raisons de clarté.

Or, pour chaque solénoïde, $B = \mu_0 n i$, donc

$$\tan \alpha = \frac{B_2}{B_1}$$

Cette relation montre que le champ résultant est simplement la somme des champs créés par les deux solénoïdes,

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$$

Ce résultat est général. S'il existe N sources de champ magnétique (aimants ou circuits), le champ résultant en un point M est :

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^N \vec{B}_i$$

Dans le vide, les champs magnétiques en un point de l'espace se somment vectoriellement.

Ce résultat n'est a priori vrai que dans le vide. Au sein d'une masse ferreuse, les champs magnétiques ne se somment pas toujours vectoriellement (phénomènes non linéaires dans le fer).

III - Moment magnétique

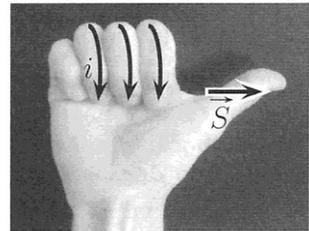
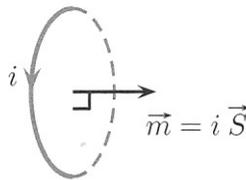
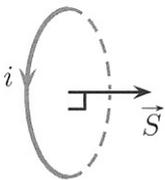
III-1) Vecteur surface

La notion de moment magnétique introduite dans cette section permet d'unifier la description des différentes sources de champ magnétique (circuits électriques et aimants). Cette notion nécessite de définir le vecteur surface d'un circuit électrique. Conformément au programme, on se limite aux circuits contenus dans un plan.

Soit un circuit filiforme plan dont le contour délimite une aire S . On oriente ce circuit arbitrairement en plaçant une flèche pour le courant. Le vecteur surface est défini comme $\vec{S} = S \vec{n}$, où \vec{n} est le vecteur unitaire :

- **Orthogonal au plan contenant le circuit;**
- **Orienté par le sens d'orientation du courant et la règle de la main droite.**

Le vecteur surface S a pour unité le m^2 dans le système SI.



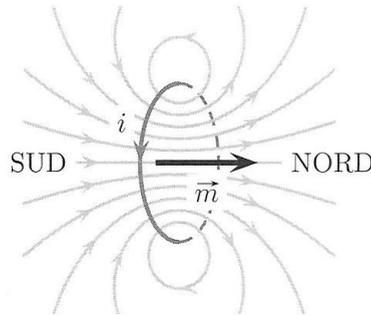
Vecteur surface \vec{S} et moment magnétique \vec{m} d'un circuit plan.

III-2) Moment magnétique

Soit un circuit filiforme de vecteur surface \vec{S} parcouru par un courant d'intensité i . Le moment magnétique \vec{m} du circuit est défini par : $\vec{m} = i\vec{S}$

Le vecteur moment magnétique s'exprime en Am^2 en unités SI et pointe du sud vers le nord du circuit.

Moment magnétique et lignes de champ magnétique pour une spire. Le moment magnétique pointe du sud vers le nord.



Un enroulement de N spires jointives (solénoïde) parcourues par l'intensité i est équivalent à une seule spire parcourue par l'intensité Ni . En conséquence, le moment magnétique d'une bobine de N spires est :

$$\vec{m} = Ni\vec{S}$$

Remarque : L'orientation du courant (flèche de i) est arbitraire et ne préjuge en rien du sens réel du courant dans le circuit. Elle indique simplement que l'intensité est comptée positive si le courant circule effectivement dans le sens de la flèche. L'intensité i est donc algébrique, c'est-à-dire qu'elle peut être positive ou négative dans toutes les relations données. Par exemple, l'expression du champ $\vec{B} = \mu_0 n i \vec{u}_z$ du solénoïde infini est toujours valable, quel que soit le signe de i : si on inverse le sens du courant, on inverse aussi le sens du champ magnétique. De même, i est algébrique dans la définition

$\vec{m} = i \vec{S}$ du moment magnétique. Le vecteur surface S est orienté par le sens arbitraire de la flèche de i (et par la règle de la main droite). Le sens de S est donc fixé une fois pour toutes, indépendamment du signe de i . Ainsi, si le sens du courant change, le sens de $\vec{m} = i \vec{S}$ aussi. Cela inverse les pôles nord et sud de la bobine, ce qui est normal, car le sens du champ magnétique créé est aussi inversé.

III-3) Moment magnétique d'un aimant

Puisqu'un aimant droit et un solénoïde génèrent des champs magnétiques de même géométrie, on peut définir le moment magnétique d'un aimant droit comme le moment magnétique : $\vec{m} = N i \vec{S}$ du solénoïde de même taille que l'aimant et qui produirait le même champ que l'aimant.

- Exercice

On considère un aimant droit cylindrique de section $S = 1,0 \text{ cm}^2$, de longueur $L = 10 \text{ cm}$, générant en son pôle nord un champ magnétique $\vec{B}_a = B_a \vec{u}_z$ d'intensité $B_a = 0,10 \text{ T}$, où \vec{u}_z est le vecteur unitaire dirigé selon l'axe du cylindre du sud vers le nord de l'aimant. Déterminer le moment magnétique \vec{m} de cet aimant.

On considère un solénoïde fictif, de mêmes dimensions que l'aimant, possédant N spires. Le nombre de spires par unité de longueur est $n = N/L$ et le champ magnétique créé est donné par l'expression classique $\vec{B} = \mu_0 n i \vec{u}_z$. En toute rigueur, cette expression est valable uniquement pour un solénoïde infiniment long.

Estimons le rapport longueur/rayon. En notant r le rayon, $S = \pi r^2$, donc :

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ m et } \frac{L}{r} = 18$$

Ce rapport est grand devant 1, donc le solénoïde peut être considéré comme long. Cependant, l'expression est valable dans le solénoïde et commence à devenir fautive près de ses extrémités (zones où les lignes de champ magnétique s'écartent les unes des autres, donc où l'intensité du champ décroît). Faut de mieux, on admet que le champ à l'extrémité du solénoïde est encore donné par cette expression. On veut que le solénoïde fictif modélise le comportement de l'aimant, ce qui impose :

$$B_a = B_s = \mu_0 n i = \frac{\mu_0 N}{L} i \Rightarrow Ni = \frac{L}{\mu_0} B_a$$

Enfin, le moment magnétique du solénoïde est

$$m = NiS = \frac{L}{\mu_0} B_a \cdot S \Rightarrow m = 0,8 \text{ Am}^2$$

Cette valeur numérique n'est qu'un ordre de grandeur, car le raisonnement repose sur une approximation.