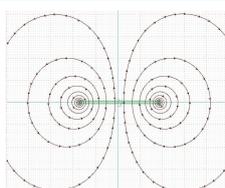


## Le Champ magnétique



		<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Le champ magnétique</b>	<b>1</b>
1.1	Rappels . . . . .	1
1.2	Carte de champ . . . . .	1
1.3	Propriétés du champ magnétique . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Exemples</b>	<b>4</b>
2.1	Champ créé par un fil infini . . . . .	4
2.2	Champ créé par une spire . . . . .	5
2.3	Champ créé par une bobine longue . . . . .	6
2.4	Bobines de Helmholtz . . . . .	7
2.5	Cas des aimants . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Dipôle magnétique</b>	<b>8</b>
3.1	Vecteur surface . . . . .	9
3.2	Moment dipolaire magnétique . . . . .	9
3.3	Champ magnétique du dipôle . . . . .	10

# 1. Le champ magnétique

## 1.1. Rappels

Le champ magnétique  $\vec{B}$  est créé par les courants électriques. Dans le cas des aimants, c'est l'alignement des spins dans une même direction qui crée le champ magnétique. Ce champ existe *a priori* en tout point de l'espace.

On distingue plusieurs types de courants électrique :

- ◇ **courant de conduction** : c'est le courant créé par le déplacement des porteurs de charge dans un conducteur fixe.
- ◇ **courant de convection** : c'est le courant créé par le déplacement d'un conducteur portant des charges fixes.
- ◇ **courant particulaire** : c'est le courant créé par un faisceau de particules sans support matériel.

La norme du champ magnétique s'exprime en Tesla (T).

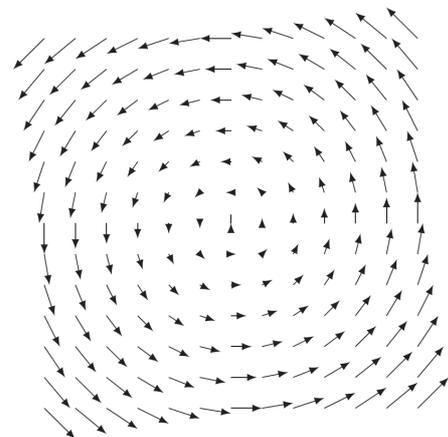
Source	Champ (T)
Champ magnétique terrestre	$47.10^{-6}$
Aimant usuel	0,1 à 1
Appareil d'IRM	3
Aimants de guidage du LHC	9
Spectromètre RMN	23,5

## 1.2. Carte de champ

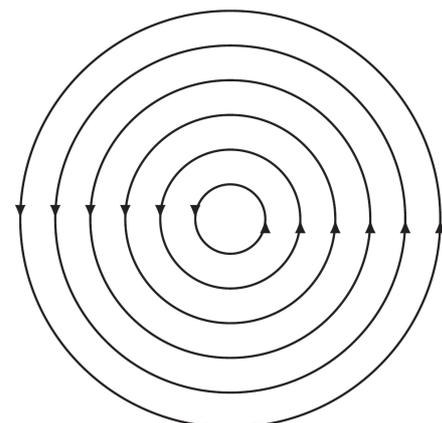
Le champ magnétique est un champ vectoriel : en tout point de l'espace de coordonnées  $(x, y, z)$ , il est représenté par un vecteur  $\vec{B}$  de coordonnées  $(B_x(x, y, z), B_y(x, y, z), B_z(x, y, z))$ .

On peut représenter graphiquement un champ vectoriel en traçant, pour quelques points, le vecteur associé.

En cas de fortes variations de la norme du champ, cette représentation n'est pas adaptée : le vecteur associé est tellement petit qu'il n'est pas représentable.



On trace alors les **lignes de champ** : ce sont des courbes qui sont en tout point tangentes aux vecteurs.

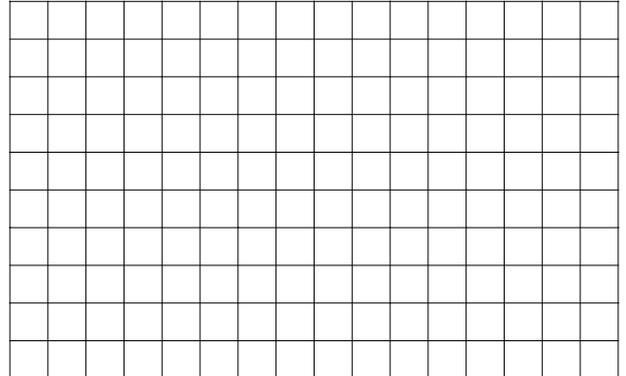


### 1.3. Propriétés du champ magnétique

→ Le champ magnétique est proportionnel à l'intensité  $I$  du courant qui lui donne naissance.

→ **le champ magnétique est un champ axial :**

Les lignes de champ magnétique sont des courbes fermées. Lorsque le champ magnétique est créé par un courant, les lignes de champ entourent les fils parcourus par un courant. Le sens du champ magnétique est orienté positivement par le sens du courant.



Rq On peut utiliser la règle de la main droite pour trouver rapidement le sens du champ magnétique connaissant celui du courant : le pouce étant placé dans le sens du courant, le sens d'enroulement de la main donne le sens de  $\vec{B}$ .

→ Les lignes de champ ne se coupent qu'aux points où :

.....

.....

.....

.....

→  $\vec{B}$  est à flux conservatif :  
 Sur une carte de champ magnétique, les lignes de champ se resserrent dans les régions où la norme du champ magnétique augmente.

→ **Principe de Curie**  
 Le champ magnétique a au moins les mêmes invariances et propriétés de symétrie que la distribution de courant qui lui donne naissance.  
 Un système est invariant par une transformation géométrique si celle-ci engendre, pour tout observateur fixe, une situation identique à la situation d'origine.



Application 2

En utilisant les propriétés de symétrie ou d'antisymétrie des courants, déterminer la direction du champ magnétique créé en  $M$  par le cylindre infini de l'exercice précédent.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

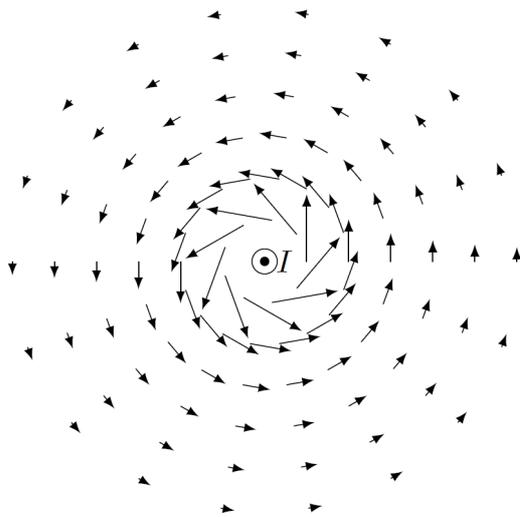
.....

.....

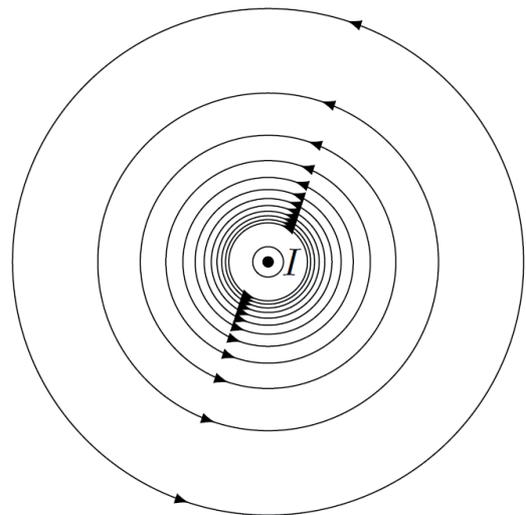
**2. Exemples**

**2.1. Champ créé par un fil infini**

On considère un fil infini d'axe  $Oz$  parcouru par un courant  $I > 0$  orienté dans le sens des  $z$  croissants.



Champ magnétique créé par un fil infini



Lignes de champ (fil infini)

D'après les applications qui précèdent, le champ magnétique créé par le fil est orthoradial et ne dépend que de la distance au fil.

On constate que les lignes de champ magnétique s'écartent quand on s'éloigne du fil. Le champ magnétique diminue donc lorsqu'on s'éloigne du fil.

La théorie (vue en spé) montre que le champ magnétique se met sous la forme :

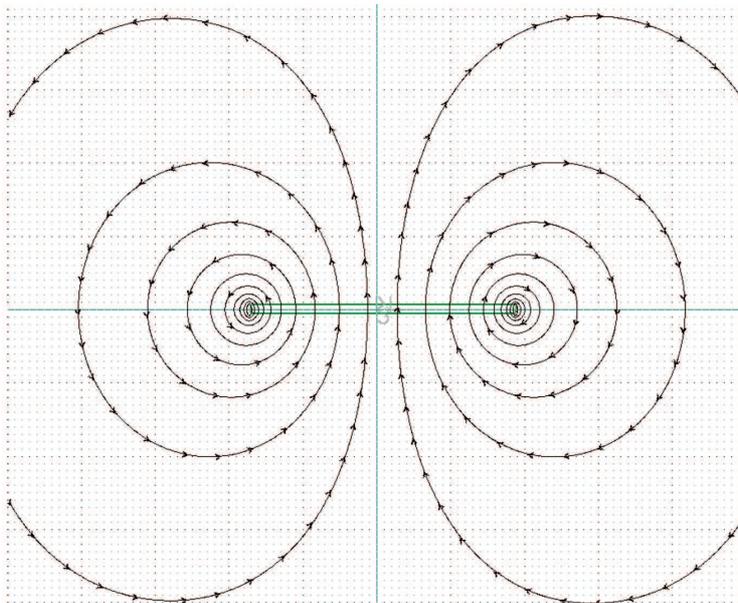
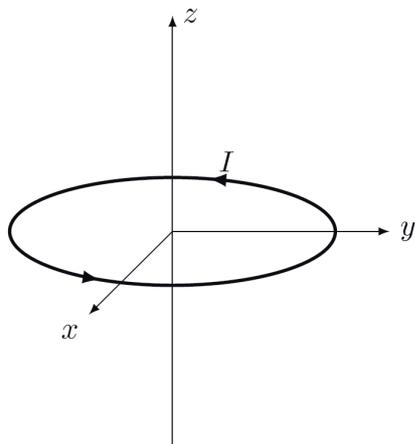
$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \vec{u}_\theta$$

où  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$  est la perméabilité du vide. On retrouve bien la diminution du champ avec la distance au fil, et l'allure circulaire des lignes de champ.

Rg

## 2.2. Champ créé par une spire

On considère maintenant une spire circulaire de rayon  $R$  et d'axe  $(Oz)$  parcourue par un courant  $I$  orienté positivement par l'axe  $z$ . La carte de champ obtenue par simulation est visible ci-contre.



Lignes de champ obtenues par simulation.  
Vue en coupe dans le plan  $(yOz)$

On constate en analysant la carte des lignes de champ, que l'écartement entre les lignes de champ n'est pas constant : le champ n'est pas uniforme et est plus intense à l'intérieur de la spire.

D'autre part, l'orientation des lignes de champ suit la règle de la main droite :

.....

.....

.....

.....

.....

.....

### Application 3

Le champ magnétique au centre d'une spire circulaire de rayon  $r$  et parcourue par un courant  $I$  est :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2r} \vec{u}_z$$

Calculer le champ magnétique au centre d'une spire de rayon  $r = 5$  cm et parcourue par un courant  $I = 10$  A.

.....

.....

.....

.....

Rq Dans le cas d'une spire ou d'un empilement de spires, il est possible d'utiliser une version différente de

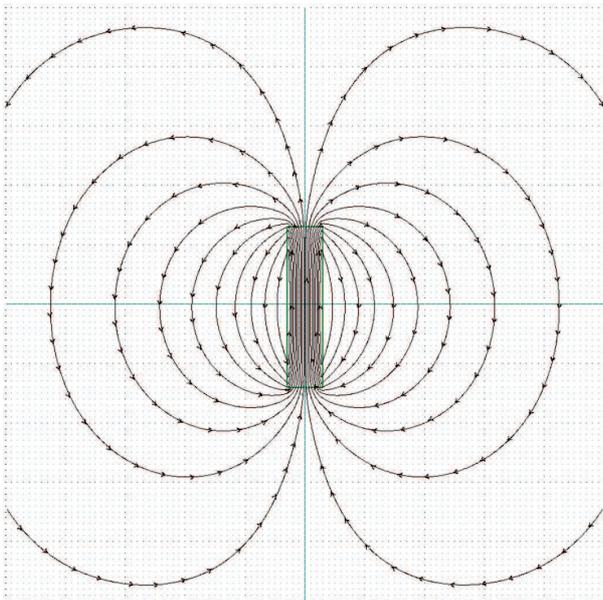
Rq

la règle de la main droite pour trouver le sens du champ magnétique au centre de la spire : la main s'enroulant dans le sens du courant, le pouce donne le sens de  $\vec{B}$ .  
Avec la géométrie de la spire ci-dessus, la main s'enroule autour de l'axe  $(Oz)$  et le pouce donne un champ selon  $+\vec{u}_z$ .

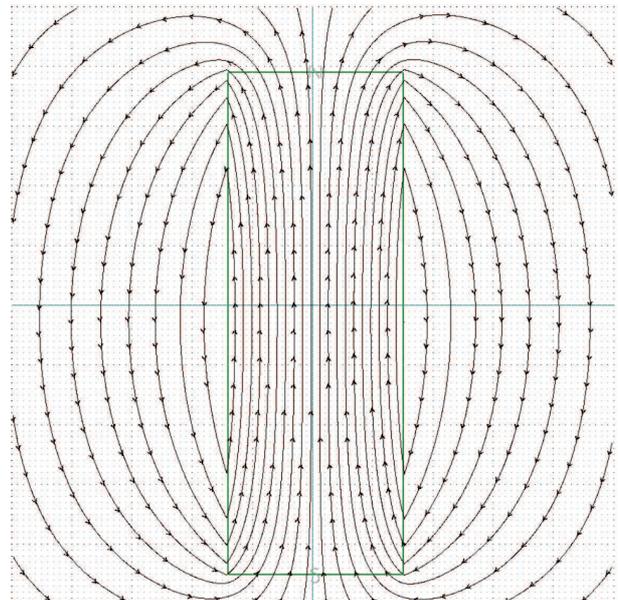
### 2.3. Champ créé par une bobine longue

Une bobine longue (aussi appelée **solénoïde**) est constituée de  $N$  spires jointives et isolées électriquement, de même axe, de même rayon et toutes parcourues par le même courant d'intensité  $i$ .

Le théorème de superposition nous invite à supposer que le champ  $\vec{B}$  créé par le solénoïde sera une somme de champs créés par une spire.



Lignes de champ créées par un solénoïde



Allure des lignes de champ à l'intérieur du solénoïde

#### Spectre magnétique d'une bobine longue

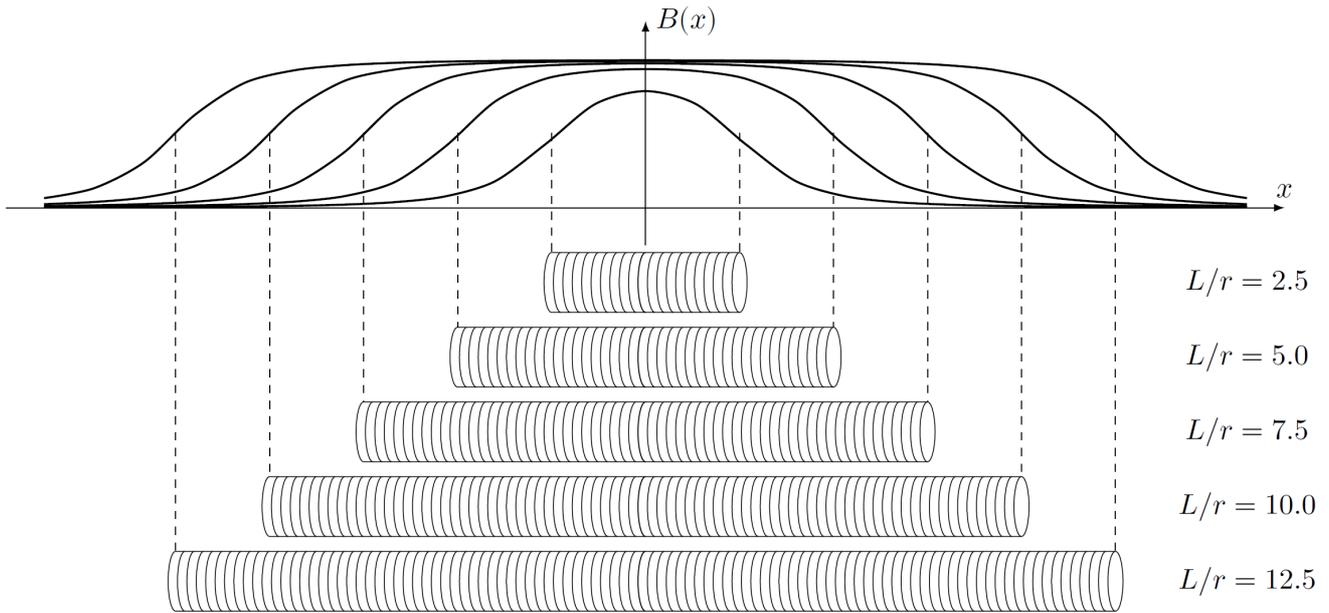
On voit sur la figure que :

- ◇ l'allure du champ magnétique loin du solénoïde est similaire à celui d'une seule spire,
- ◇ le sens du champ magnétique à l'intérieur du solénoïde est donné par la règle de la main droite,
- ◇ les lignes de champ sont verticales et parallèles dans une région au centre du solénoïde : le champ magnétique y est uniforme.

On distinguera alors deux zones dans le solénoïde :

- ◇ un centre, où le champ magnétique est uniforme,
- ◇ des bords où les lignes de champs s'écartent : la norme du champ diminue et la direction du champ dépend de la position. Ce phénomène est appelé **effet de bord**.

Dans le cas d'un solénoïde long (pour lequel la longueur  $L$  est grande devant le rayon  $r$ ), on voit sur la figure qu'on peut négliger l'extension spatiale de la région dans laquelle se produisent les effets de bord devant la taille de la zone de champ uniforme. C'est le modèle du **solénoïde infini**.



Allure du champ magnétique sur l'axe en fonction de la longueur du solénoïde. Le nombre de spires par unité de longueur  $n$  est constant.

**Définition**

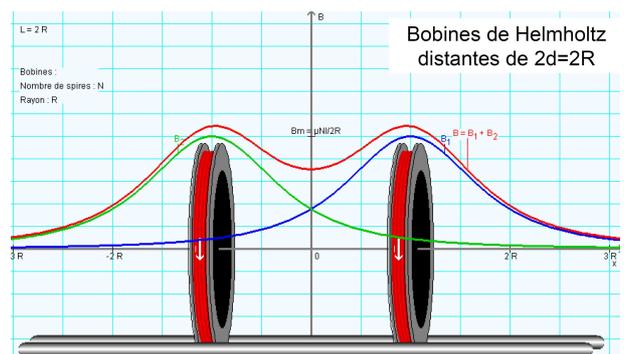
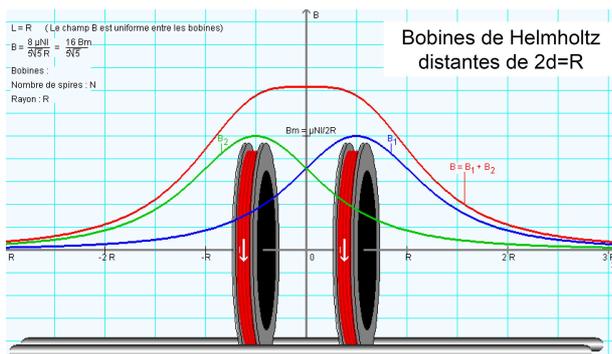
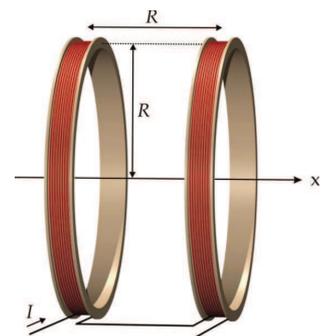
À l'intérieur d'un solénoïde infini, le champ magnétique est uniforme, parallèle à l'axe de la bobine et orienté par la règle de la main droite. Si on note  $n$  le nombre de spires par unité de longueur, la norme du champ créé à l'intérieur du solénoïde est :

$$B = \mu_0 n i$$

où  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$  est la perméabilité du vide.

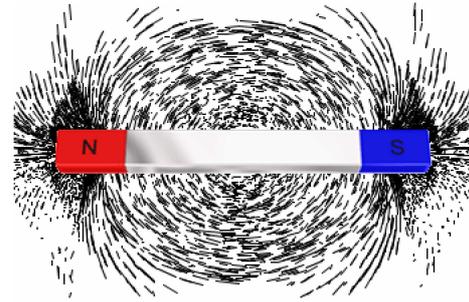
**2.4. Bobines de Helmholtz**

- ◇ **Dispositif** : ensemble de 2 spires planes circulaires filiformes (ou 2 bobines plates) de même rayon  $R$  de même axe situées à une distance  $2d$  l'une de l'autre.
- ◇ **Intérêt** : quand ces spires ou bobines sont parcourues par le même courant  $I$  dans le même sens et distantes de  $2d = R$ , elles créent un champ  $\vec{B}$  quasi uniforme entre les 2 bobines.



## 2.5. Cas des aimants

Les aimants créent un champ magnétique sans nécessiter un courant. À l'échelle microscopique, les mouvements des électrons (moment magnétique de spin) créent des boucles de courant. Un aimant crée un champ magnétique parce que toutes ces boucles de courant ont la même direction.

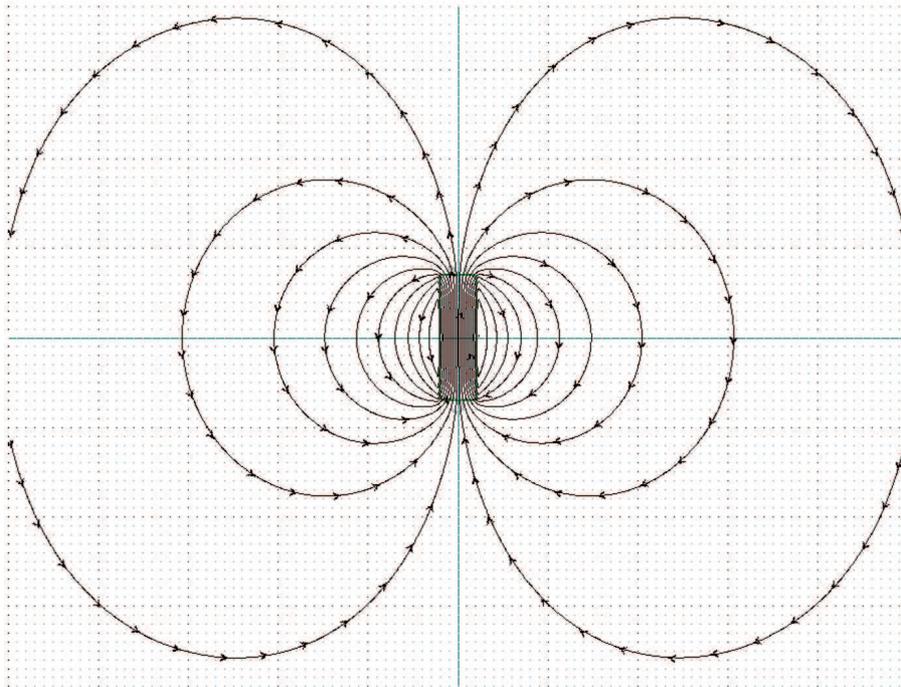


Si on augmente la température d'un aimant au-delà d'une certaine limite, il perd son aimantation. Cette température limite est appelée **température de Curie**. Elle est de l'ordre de 600 K pour les aimants les plus courants.

Rq

Le phénomène est réversible : si la température redescend, l'aimant retrouve son aimantation.

Le spectre magnétique d'un aimant droit : on constate que cette carte de champ est similaire à celle d'une spire ou d'une bobine. Par convention, le pôle Nord est celui par lequel sortent les lignes de champ.



Lignes de champ créées par un aimant permanent.

## 3. Dipôle magnétique

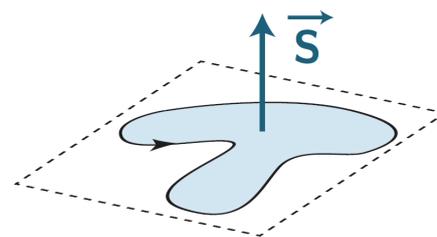
On a vu que l'allure générale du spectre magnétique de la spire, de la bobine et de l'aimant sont similaires si on se place loin de la source du champ

Le dipôle magnétique est un **modèle** susceptible de représenter un "petit" objet magnétique (ou un "petit" aimant). La notion de taille de l'objet est ici relative à la distance d'observation : un dipôle magnétique permettra de représenter un objet créant un champ magnétique pour peu que ses dimensions caractéristiques soient petites devant la distance d'observation.

### 3.1. Vecteur surface

On définit une surface délimitée par un contour. On oriente ce contour.  
Le vecteur surface  $\vec{S}$  est tel que :

- ◊  $\|\vec{S}\| = S$  où  $S$  est le norme de la surface.
- ◊ le vecteur est dirigé perpendiculairement à la surface.
- ◊ le sens  $\vec{S}$  est déterminé par l'orientation du contour et la règle de la main droite.



Rq

Si la surface considérée n'est pas plane, on définit alors une surface élémentaire qui vérifie les propriétés précédentes puis on intègre sur toute la surface.  
Dans le cas d'une surface fermée, on oriente conventionnellement les vecteurs surface élémentaire vers l'extérieur.

### 3.2. Moment dipolaire magnétique

#### 3.2.1. Cas d'un circuit filiforme

On considère un contour ( $C$ ) plan, fermé et orienté.  
On associe à ce contour le vecteur surface  $\vec{S}$  :

.....

.....

.....

.....

.....

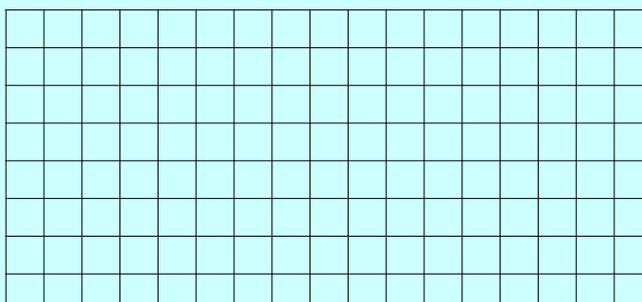
.....

Rq

- ◊ Le vecteur surface ne dépend pas de la surface utilisée, mais uniquement du contour et de son orientation.
- ◊ La norme de  $\vec{S}$  est égale à la surface projetée dans le plan du contour.

Application 4

Pour une spire de rayon  $R$  :



Le moment magnétique d'une boucle ( $C$ ) parcourue par un courant  $I$  et orientée dans le sens du courant est donné par :

$$\vec{M} = I \cdot \vec{S}$$

Ce moment magnétique s'exprime en  $A \text{ m}^2$ .

Rq

Comme le champ magnétique créé par le dipôle magnétique ne dépend que de  $\vec{M}$  et pas de la forme du contour, on pourra modéliser le moment magnétique de n'importe quel contour par une spire parcourue par un courant  $I$  et de rayon  $r$  tel que  $S = \pi r^2$ .

### 3.2.2. Cas d'une distribution

En considérant que l'on peut décomposer toute distribution limitée dans l'espace comme un ensemble de contenu filiformes :

$$\vec{M} = \int d\vec{M}$$

### 3.2.3. Cas des aimants

On a déjà vu que le champ magnétique créé par un aimant avait pour origine la combinaison des moments magnétiques microscopiques à l'intérieur de l'aimant.

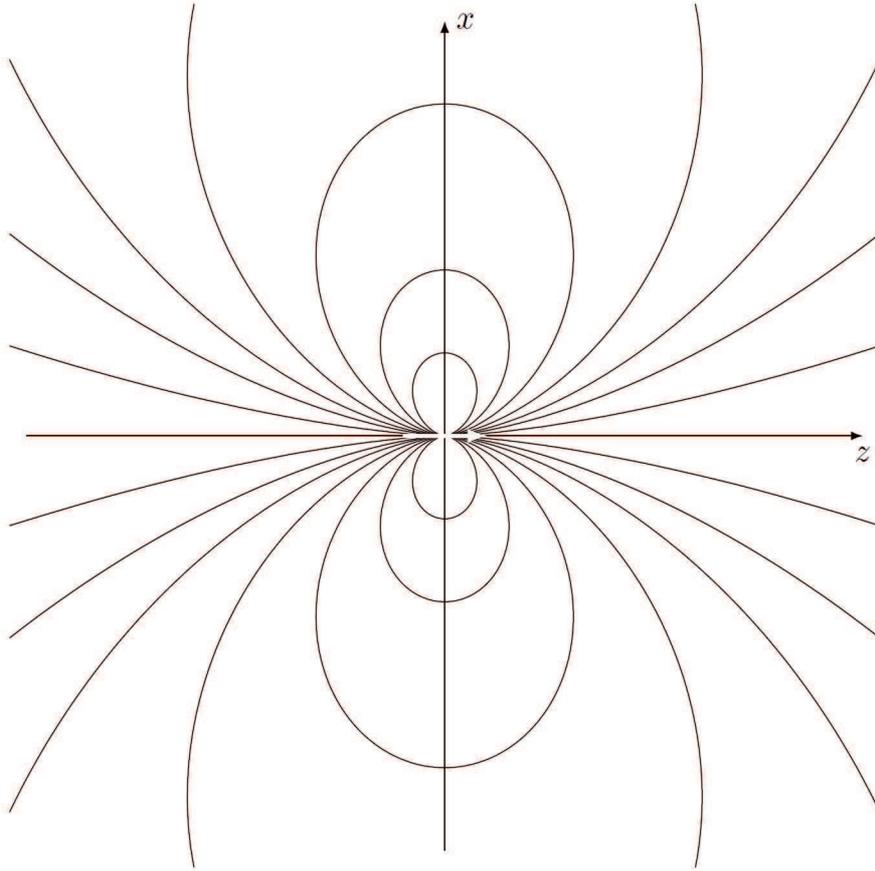
Pour les aimants, il y a donc une relation de proportionnalité entre le moment dipolaire total et le volume du matériau.

Il est d'usage de caractériser un matériau magnétique par son **aimantation**  $M$  qui représente une densité volumique de moment dipolaire :

$$M = \frac{\mathcal{M}}{V}$$

### 3.3. Champ magnétique du dipôle

#### 3.3.1. Carte de champ du dipôle



#### 3.3.2. Expression du champ créé (pour information)

Le champ créé en tout point de l'espace est donné par :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \mathcal{M}}{2\pi r^3} \cos \theta \vec{u}_r + \frac{\mu_0 \mathcal{M}}{4\pi r^3} \sin \theta \vec{u}_\theta$$