

IND1 : Champ magnétique

Dans ce premier chapitre dans le thème INDUCTION, nous allons identifier les différentes sources de champ magnétique, et donner les caractéristiques de ces champs. Nous introduirons aussi la notion de moment magnétique.

Plan du cours

I Le champ magnétique	2	II.1 Propriétés de symétrie et invariances	5
I.1 Notion de champ	2	II.2 Fil infini	5
I.2 Le magnétisme	2	II.3 Spire circulaire	7
I.3 Sources de champ et ordres de grandeur . . .	3	II.4 Bobines	8
I.4 Carte de champ	4	III Moment magnétique	10
II Champs magnétiques créés par des courants	5	III.1 Vecteur surface	10
		III.2 Moment magnétique d'une boucle plane . . .	11
		III.3 Moment magnétique d'un aimant permanent	11
		III.4 Ordres de grandeur	11

À savoir par

- ✓ Allure des cartes de champs magnétiques pour un aimant droit, une spire circulaire et une bobine longue.
- ✓ Dispositifs permettant de réaliser un champ magnétique quasi uniforme.
- ✓ Ordres de grandeur de champs magnétiques : au voisinage d'aimants, dans un appareil d'IRM, dans le cas du champ magnétique terrestre.
- ✓ Définition du moment magnétique associé à une boucle de courant plane.
- ✓ Ordre de grandeur du moment magnétique associé à un aimant usuel.

À savoir faire

- ✓ Exploiter une représentation graphique d'un champ vectoriel, identifier les zones de champ uniforme, de champ faible, et l'emplacement des sources.
- ✓ Évaluer l'ordre de grandeur d'un champ magnétique à partir d'expressions fournies.
- ✓ Orienter le champ magnétique créé par une bobine « infinie » et connaître son expression.
- ✓ Par analogie avec une boucle de courant, associer à un aimant un moment magnétique.

I Le champ magnétique

I.1 Notion de champ

♥ Définition

Champ : c'est un outil physique associant à chaque point de l'espace une grandeur physique, scalaire (\rightarrow champ scalaire) ou vectorielle (\rightarrow champ vectoriel), qui dépend de l'espace et du temps.

Un champ est dit uniforme dans une région de l'espace si à t donné ses caractéristiques sont les mêmes en tout point de cette région.

Un champ est dit permanent ou stationnaire s'il ne dépend pas de t : la grandeur physique est la même à tout instant, en un point M donné.



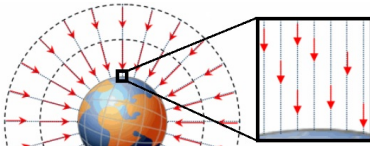
Remarques

- Les champs vectoriels (électrique, magnétique, de gravitation, de pesanteur) sont les intermédiaires qui transmettent les actions mécaniquement observables. Ils contiennent une certaine énergie, fournie à l'objet qui se met en mouvement.
- Pour représenter un champ de vecteurs, on passe aux lignes de champ en traçant les courbes qui sont en tout point tangentes aux vecteurs. Pour garder l'information sur la norme du champ, on prend en général la convention que plus la norme est importante, plus on dessine des lignes de champs serrées.

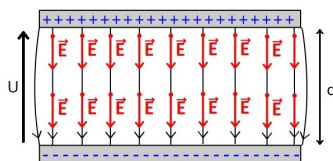
Exemples :



Le champ de température est un champ scalaire.



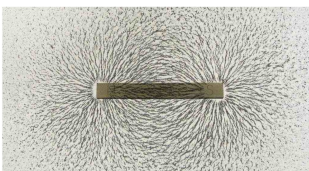
Le champ gravitationnel est un champ vectoriel. Au voisinage de la Terre, il peut être considéré uniforme (\rightarrow champ de pesanteur).



Le champ électrique est champ vectoriel. Entre les plaques d'un condensateur, il est uniforme, perpendiculaire aux plaques, dirigé du + vers le - et de norme $E = \frac{U}{d}$

I.2 Le magnétisme

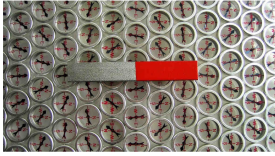
Dès l'antiquité, les hommes remarquent qu'un minéral naturel, appelé « magnétite » (essentiellement de l'oxyde de fer), a la propriété d'attirer de petits morceaux de fer. Cette interaction est appelée **magnétisme**, les solides capables d'attraction magnétique étant appelés **aimants**. On constate que les aimants, quelle que soit leur forme et leur taille, sont **polarisés** (= ils ont un pôle Nord et un pôle Sud). Si un aimant est brisé, chacun des éclats possède à nouveau deux pôles.



Observations: On peut visualiser le champ magnétique d'un aimant en disposant à sa proximité de la limaille de fer (= des petits « grains » de fer de forme allongée) : la limaille de fer dispose selon une géométrie particulière. Les copeaux de fer s'alignent allant d'un pôle à un autre.



Remarque



Si on place un ensemble de boussoles (c'est-à-dire des petits aimants) au niveau de l'aimant, on remarque de plus que ceux-ci s'orientent dans la même direction le long d'une ligne.

Interprétation en utilisant un champ comme intermédiaire :

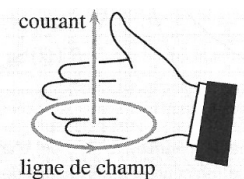
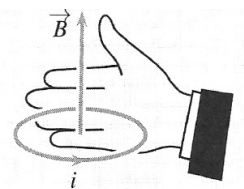
Rappel: un champ magnétique dévie des particules chargées. L'aimant a donc une action à distance sur les électrons. On peut décrire ce phénomène en deux étapes :

- la présence de l'aimant modifie les propriétés de l'espace autour de lui en créant un champ magnétique \vec{B} en tout point.
- l'électron, particule chargée, en mouvement dans la région de l'espace où règne le champ \vec{B} subit la force de Lorentz : $\vec{F}_{\text{mag}} = q \vec{v} \wedge \vec{B}$

1.3 Sources de champ et ordres de grandeur

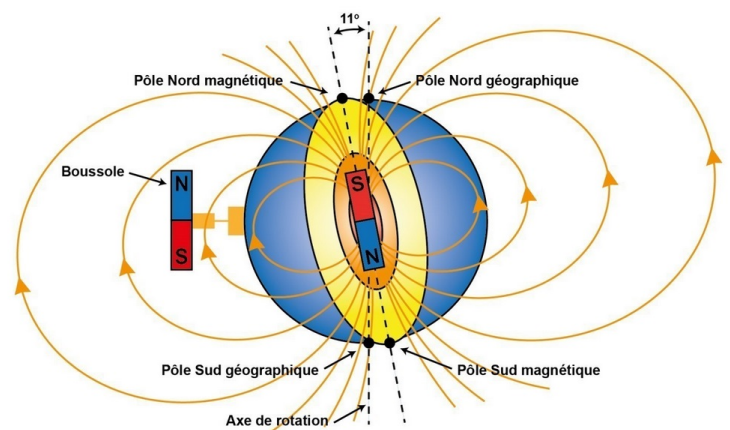
Un champ magnétique peut être créé par :

- **un matériau ferromagnétique** : c'est un matériau dont les atomes comportent un ou des électrons non appariés, dont les spins peuvent s'orienter dans le sens d'un champ magnétique extérieur appliqué et interagir entre eux, ce qui fixe leur orientation, même si on supprime \vec{B}_{ext} . On distingue :
 - les ferromagnétiques durs : leur champ rémanent est intense, persiste très longtemps, même en présence de petits champs magnétiques externes. On les utilise pour fabriquer les aimants permanents. Exemples : alliage AlNiCo, magnétite, aciers spéciaux (alliage néodyme-fer-bore,...)
 - les ferromagnétiques doux : leur champ rémanent est fort, mais est facilement réorienté par l'application d'un champ magnétique extérieur. On les utilise dans les moteurs, les transformateurs, les alternateurs, où ils sont soumis à des champs magnétiques variables. Exemples : le fer, et les aciers spéciaux dits « fer doux » (alliage fer-nickel-molybdène, fer-silicium,...)
- **un courant** :
 - une spire parcourue par un courant crée un champ \vec{B} perpendiculaire à la spire, on le détermine avec la règle de la main droite : I sort par les ongles des 4 doigts (index à auriculaire), \vec{B} est donné par le pouce ;
 - un fil parcouru par un courant crée un champ \vec{B} qui s'enroule autour du fil, on le détermine aussi avec la règle de la main droite : I sort par l'ongle du pouce, les 4 autres doigts donnent le sens de \vec{B} .



⇒ **Tout circuit électrique**, parcouru par un courant est source de champ magnétique.

- **le noyau de la Terre** : le noyau externe de la Terre est composé essentiellement de fer (matériau conducteur), en fusion car à haute température. Les mouvements de convection de magma, comme tout courant, un champ magnétique. La carte de ce champ est assez complexe, mais globalement, on peut le modéliser comme le champ créé par un aimant droit, dont le pôle Nord est actuellement situé proche du pôle Sud géographique.



♥ Propriétés

Sources et ordres de grandeur de champ magnétique :

- Le champ magnétique, noté \vec{B} est créé par des aimants, des conducteurs parcourus par des courants et la Terre.

— Ordres de grandeur :

Source	Terre	Aimant usuel	Appareil IRM
Valeur en tesla	$4,7 \times 10^{-5} \text{ T}$	0,1 T à 1 T	plusieurs T



Remarque

Dans le vide, la norme du champ magnétique créé par un courant est proportionnelle à l'intensité de ce courant (voir partie II).

I.4 Carte de champ

♥ Définitions

Ligne de champ magnétique : courbe orientée tangente en tout point au champ magnétique.

Carte de champ : visualisation du champ vectoriel dans une région donnée de l'espace, sur laquelle sont tracées plusieurs lignes de champ.

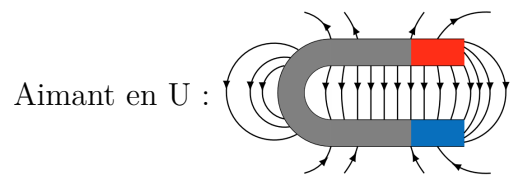
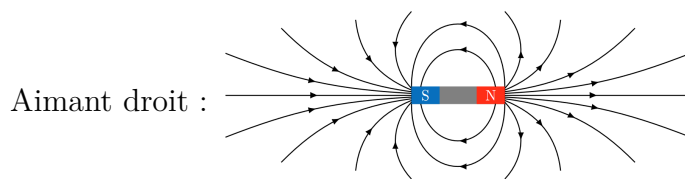
★ Méthode : Analyse d'une carte de champ

• Propriétés générales

- Les lignes de champ magnétique sont toujours fermées.
- Si deux lignes de champ se coupent en un point, alors le champ est nul en ce point.
- Dans une zone de champ magnétique uniforme, les lignes de champ magnétique sont parallèles entre elles.
- Le champ magnétique augmente dans des zones où les lignes de champ se resserrent. Le champ magnétique diminue dans les zones où les lignes de champ s'éloignent.

• Lignes de champ des aimants

Les lignes de champ magnétique d'un aimant quittent son pôle nord (souvent matérialisé en rouge) et entrent par son pôle sud :



- Les lignes de champ sortent du pôle nord d'un aimant droit.
- Le champ magnétique est uniforme dans l'entrefer d'un aimant droit.

• Lignes de champ d'un circuit électrique

- Les lignes de champ magnétique d'un circuit électrique filiforme entourent les fils électriques : on dit qu'elles enlacent les courants qui les créent.



Remarque

Il y a perte d'informations dans cette représentation car la valeur de $\|\vec{B}\|$ n'est pas connue, mais on a accès à l'évolution de sa valeur : elle est d'autant plus élevée que les lignes de champ sont rapprochées, et inversement, elle est faible quand les lignes de champ sont espacées.

II Champs magnétiques créés par des courants

L'expression du champ magnétique dépend de la distribution de courant qui lui donne naissance. Le détail de cette relation sera vu en 2^e année. L'objectif de cette partie est de dresser certaines relations qualitatives.

II.1 Propriétés de symétrie et invariances

Les propriétés de symétrie de la distribution de courant ont des conséquences sur la direction du champ magnétique, on retient les propriétés :

♥ Propriétés de symétrie

- Un plan de symétrie de la distribution de courant est un plan d'antisymétrie du champ magnétique. Ainsi, en un point M d'un plan de symétrie de la distribution de courant, le champ magnétique est perpendiculaire à ce plan.
- Un plan d'antisymétrie de la distribution de courant est un plan de symétrie du champ magnétique. Ainsi, en un point M d'un plan d'antisymétrie de la distribution de courant, le champ magnétique appartient à ce plan.

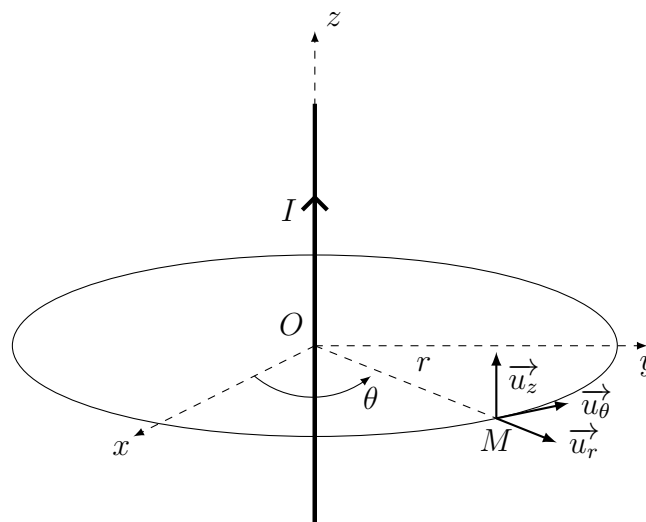
Les propriétés d'invariance de la distribution de courant (par des translations ou des rotations) ont des conséquences sur les paramètres dont va dépendre le champ magnétique :

♥ Propriétés d'invariance

- Si la distribution de courant est invariante par translation selon un axe Oz , alors le champ magnétique est indépendant de la variable z .
- Si la distribution de courant est invariante par rotation d'angle θ autour d'un axe Oz , alors le champ magnétique est indépendant de la variable θ .

II.2 Fil infini

On considère un fil infini, parcouru par un courant permanent I . On cherche à caractériser le champ magnétique créé. On utilisera les coordonnées cylindriques.



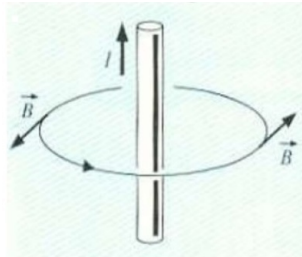
Le champ \vec{B} dépend a priori des 3 variables cylindriques (r, θ, z) et est porté par les trois vecteurs $(\vec{u}_r; \vec{u}_\theta; \vec{u}_z)$:

$$\vec{B}(r, \theta, z) = B_r(r, \theta, z)\vec{u}_r + B_\theta(r, \theta, z)\vec{u}_\theta + B_z(r, \theta, z)\vec{u}_z$$

🔪 Démonstration :

- Q1. Quel plan passant par M est plan de symétrie pour cette distribution de courant ?
- Q2. En déduire la direction du vecteur \vec{B} .
- Q3. Déterminer les invariances de la distribution de courant.
- Q4. Déduire la conséquence sur \vec{B} de ces invariances de la distribution de courant.

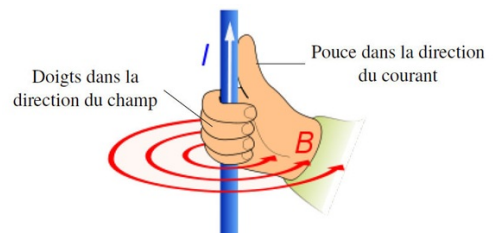
📺 Expérience filmée ici:



★ Méthode

Règle de la main droite :

- ❶ Placer le pouce dans la direction du fil, avec le courant qui « sort par l'ongle ».
- ❷ Le champ magnétique est donné par les autres doigts, il « sort par les ongles » aussi.



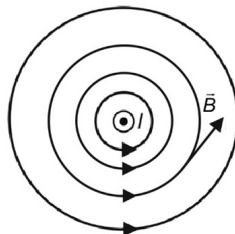
♥ Formule (admise) et carte de champ

Champ magnétique créé à distance r par un fil infini parcouru par un courant continu I :

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

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

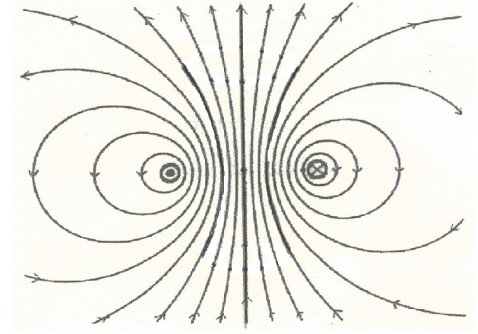
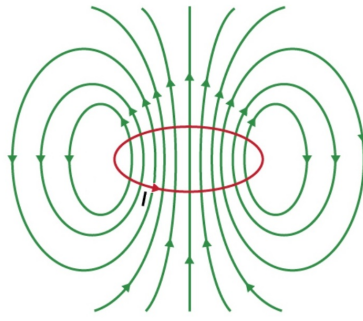
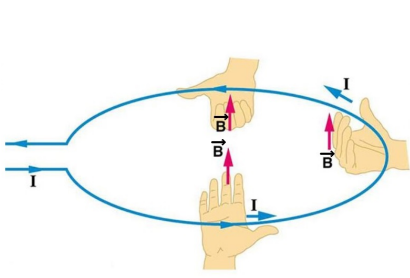
Carte de champ :



💡 Remarques

- \vec{B} est orthoradial.
- Les lignes de champ sont fermées et s'enroulent autour de la source (= le fil où circule I).
- $\|\vec{B}\|$ est bien proportionnel à I , et il décroît en $\frac{1}{r}$.
- ODG : pour $I = 1 \text{ A}$, et $r = 1 \text{ m}$, $B = 2 \times 10^{-7} \text{ T}$

II.3 Spire circulaire

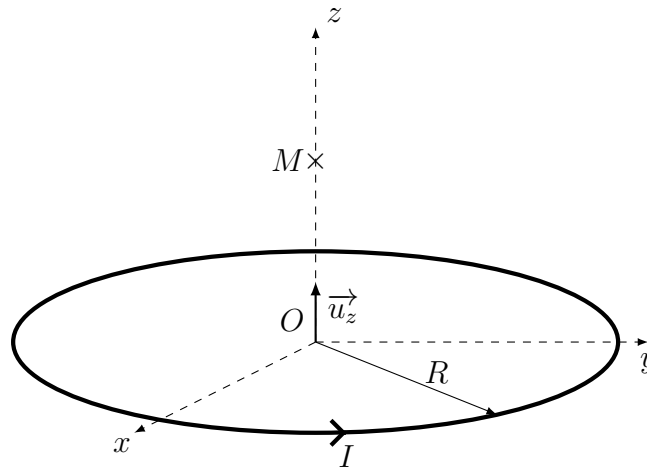


a) Visualisation du champ magnétique avec la règle de la main droite

b) Lignes de champ magnétique, vue en 3D

c) Lignes de champ magnétique, vue en coupe

On considère une spire circulaire, parcouru par un courant permanent I . On cherche à caractériser le champ magnétique créé en un point M de son axe.



Démonstration :

Q1. Analyser les plans de symétrie/antisymétrie de la distribution de courant contenant un point M de l'axe.

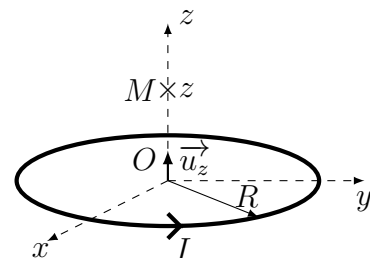
Q2. En déduire la direction de \vec{B} en un point M situé sur l'axe de la spire.

Q3. Analyser les invariances de la distribution de courant.

Formule (admise)

Champ magnétique créé sur l'axe d'une spire parcourue par un courant continu I , à distance z de son plan :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I R^2}{2} \frac{1}{(R^2 + z^2)^{3/2}} \vec{u}_z$$



💡 Remarques

- Le sens de \vec{B} est relié au sens de I par la règle de la main droite.
- Le resserrement des lignes de champ à la surface de la spire indique une augmentation de la norme du champ magnétique.
- $\|\vec{B}\|$ est bien proportionnel à I , et diminue avec z .
- Sur l'axe de la spire, \vec{B} est porté par \vec{u}_z .
- Les lignes de champ sont bien fermées et enlacent le fil où circule le courant électrique.

🔗 Application directe :

Quelle doit être l'intensité du courant dans une spire de rayon $r = 5 \text{ cm}$ pour générer en son centre un champ magnétique de norme $1,25 \text{ mT}$?

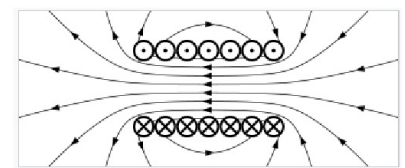
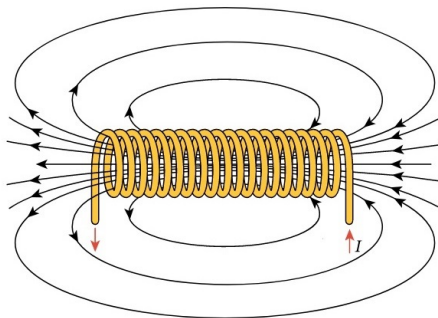
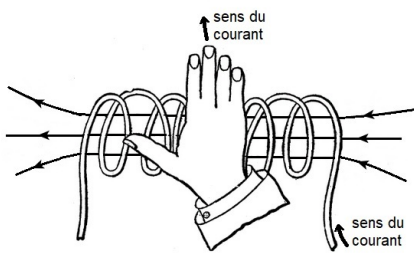
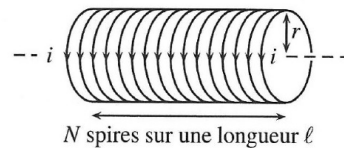
II.4 Bobines

♥ Définition

Bobine : C'est un enroulement de fil sur un support généralement cylindrique. L'intérêt est de faire de nombreux tours pour obtenir un champ magnétique plus important.

Une bobine est caractérisée par :

- sa longueur ℓ
- son rayon r
- son nombre de spires N



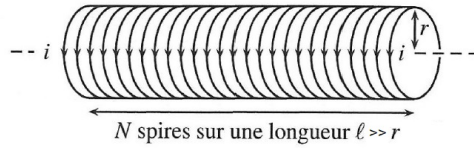
- a) Règle de la main droite b) Lignes de champ magnétique, vue en 3D c) Lignes de champ magnétique, vue en coupe

💡 Remarques

- Une bobine plate (de faible longueur par rapport à son rayon : $\ell \ll r$) comportant N spires peut être assimilée à N spires confondues donc l'allure du champ magnétique est la même que pour une spire, il est simplement N fois plus intense. En son centre on a donc :
$$\vec{B}(O) = \frac{\mu_0 N I}{2r} \vec{u}_z$$
- La règle de la main droite pour déterminer le champ créé par une bobine en son centre : Le champ magnétique sort par l'ongle du pouce lorsque la main est posée autour de la bobine avec le courant qui sort par les ongles des autres doigts.

♥ Définition et propriétés

Solénoïde : C'est une bobine de grande longueur par rapport à son rayon : $\ell \gg r$.

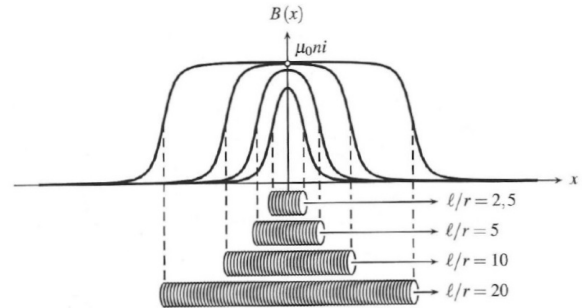
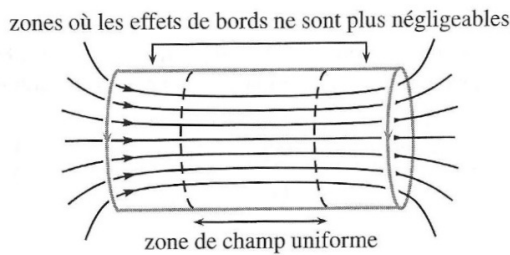


Pour un **solénoïde infini**, c'est-à-dire de très grand rapport longueur / rayon ($\ell/r \gg 1$), d'axe Oz , avec N spires au total et n spires par unité de longueur, soit $n = N/\ell$:

- le champ à l'intérieur est uniforme, le long de l'axe des spires, proportionnel à l'intensité traversant les spires et à leur densité linéique n : $\vec{B}_{\text{int}} = \mu_0 n I \vec{u}_z$
- le champ à l'extérieur est nul : $\vec{B}_{\text{ext}} = \vec{0}$

💡 Remarque

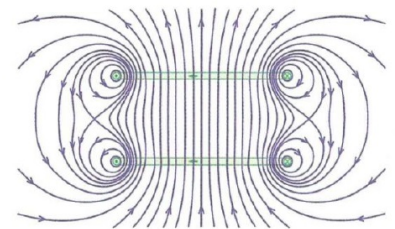
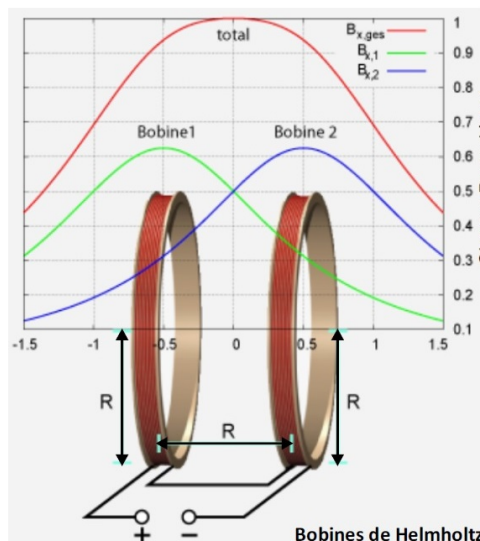
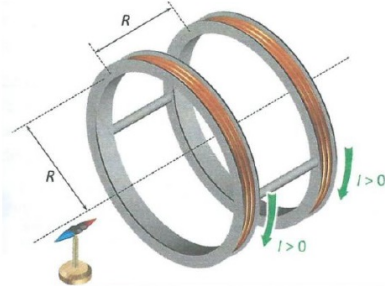
Plus la bobine est longue, par rapport à son rayon, plus la zone touchée par les effets de bords est étroite :



♥ Définition et propriétés

Bobines de Helmholtz : Il s'agit de deux bobines de même rayon R , de N spires chacune, de même axe Oz , séparées par une distance R : $L \gg R$.

L'intérêt de ce dispositif est de créer un champ uniforme entre les bobines lorsqu'elles sont parcourues par un courant de même intensité.



a) Dispositif des bobines de Helmholtz

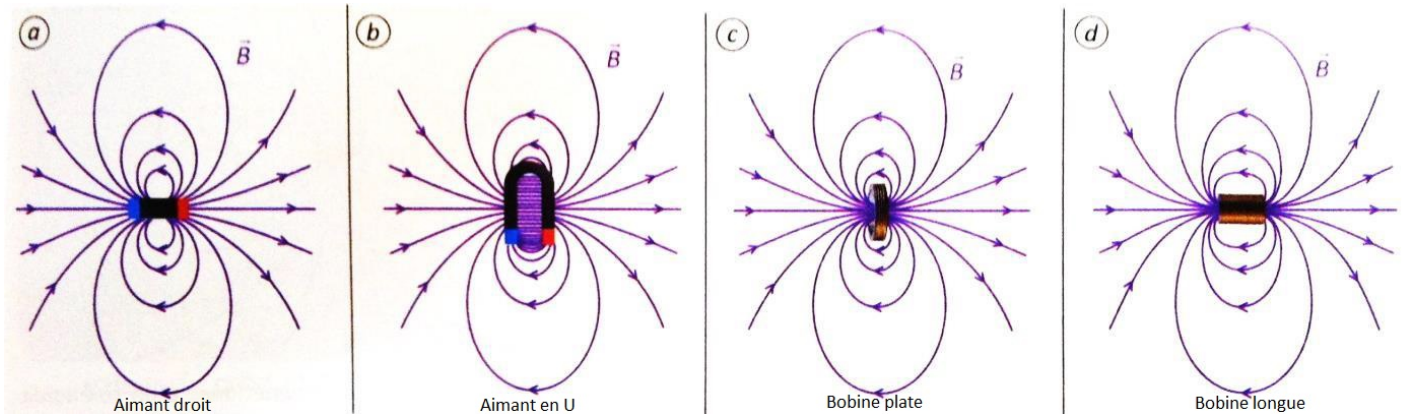
b) Addition des champs créés par les 2 bobines

c) Lignes de champ magnétique, vue en coupe

Application directe :

Donner les 3 dispositifs permettant d'obtenir un champ magnétique uniforme.

III Moment magnétique



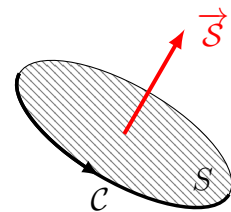
À distance d'observation grande devant la taille de la source du champ magnétique, on remarque que les cartes de champ d'un aimant droit, d'un aimant en U, d'une spire circulaire ou d'un solénoïde sont identiques. À grande distance, tous ces dispositifs sont équivalents à un dispositif de base : la spire circulaire, on dit qu'ils constituent des **dipôles magnétiques**. Afin de les comparer, on introduit leur moment magnétique \vec{m} .

III.1 Vecteur surface

♥ Définition

Vecteur surface \vec{S} associé à une boucle de courant plane \mathcal{C} :

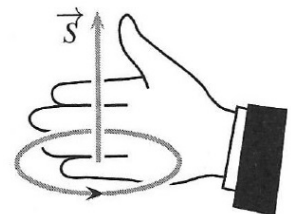
- direction : orthogonale au plan défini par la boucle plane \mathcal{C} .
- sens : donné par la **règle de la main droite**.
- norme : la surface S .



★ Méthode

Comment déterminer le sens du vecteur surface \vec{S} ?

- ① Orienter la boucle de courant (= choisir le sens positif) en mettant une flèche sur la boucle de courant.
- ② Utiliser la règle de la main droite : les 4 doigts autres que le pouce **de la main droite** épousent la courbe dans le sens de l'orientation choisi (la flèche « sort par les ongles »)
- ③ Le pouce indique alors le sens de \vec{S} , représenter le vecteur \vec{S}



💡 Remarque

On note aussi le vecteur surface $\vec{S} = S\vec{n}$ avec \vec{n} = vecteur unitaire orthogonal à la surface définie par la boucle plane.

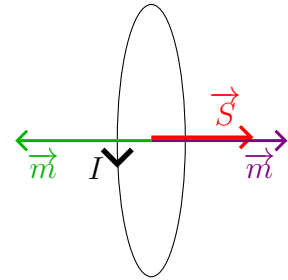
III.2 Moment magnétique d'une boucle plane

♥ Définition

Moment magnétique : c'est le vecteur $\vec{m} = I \vec{S}$

Caractéristiques du vecteur \vec{m} de la boucle de courant plane :

- direction : orthogonale au plan défini par la boucle plane
- sens :
si $I > 0$: \vec{m} est de même sens que \vec{S} (\rightarrow règle de la main droite)
si $I < 0$: \vec{m} est de sens opposé à \vec{S} .
- norme : $\|\vec{m}\| = |I| \times S$ en $A \cdot m^2$



Le moment magnétique d'un **circuit comportant N spires planes identiques coaxiales parcourues par le même courant** s'écrit

$$\vec{m} = NI \vec{S} \quad \text{avec } \vec{S} = \text{vecteur surface d'une des spires planes coaxiales}$$

III.3 Moment magnétique d'un aimant permanent

Les lignes de champ d'un aimant étant identiques à grande distance aux lignes de champ d'une boucle de courant plane, on étend la notion de moment magnétique aux aimants. Toutefois, ceux-ci ne sont parcourus par aucun courant interne donc le moment magnétique d'un aimant ne s'écrit pas en fonction d'une surface et d'un courant.

Les atomes possèdent un moment magnétique (de l'ordre de $1 \times 10^{-23} A \cdot m^2$) mais en général, dans la matière, les champs magnétiques créés par ces moments magnétiques s'annulent, car leur orientation est aléatoire. En revanche, dans un aimant permanent, tous les moments magnétiques sont sensiblement alignés, et leurs effets s'ajoutent.

Le moment magnétique d'un aimant dépend de sa taille :

$$\text{Moment magnétique (en } A \cdot m^2) = \text{volume de l'aimant (en } m^3) \times \text{aimantation volumique (en } A \cdot m^{-1})$$

La norme du moment magnétique d'un aimant usuel (en alliage Néodyme-Fer-Bore) est généralement comprise entre 0,1 et $10 A \cdot m^2$.

Le magnétisme terrestre est dû aux matériaux ferromagnétiques (fer et nickel) présents dans le noyau. Du point de vue magnétique, la Terre se comporte comme un dipôle magnétique qui serait situé en son centre, de moment $m_{\text{Terre}} \approx 8 \times 10^{22} A \cdot m^2$, dont l'axe est actuellement incliné d'une dizaine de degrés par rapport à l'axe de rotation de la planète sur elle-même.

III.4 Ordres de grandeur

🔧 Application directe :

Moment magnétique de ...	norme de \vec{m}
une spire de 10 cm de diamètre parcourue par un courant $I \sim 1 A$	$m \simeq$
un aimant permanent puissant	$m \simeq$
un électron	$\mu_B \simeq$ = magnéton de Bohr, dû au moment cinétique orbital de l'électron et à son spin
la Terre	$m_{\text{Terre}} \simeq$