

Induction Electromagnétique

CHAPITRE 1

Champ

magnétique

Dr N'CHO Janvier Sylvestre

Introduction

Dans la Grèce Antique, il avait été observé par un berger du nom de Magnes qu'un matériau, la magnétite, attirait le fer. Ce berger vivait dans la cité de Magnésie. Ce nom a plus tard formé le mot magnétisme. Les premières applications du magnétisme concernent la boussole, inventée par les Chinois. Par la suite, cet instrument fut utilisé par les navigateurs afin de s'orienter grâce au magnétisme terrestre. Actuellement, les champs magnétiques trouvent diverses applications importantes, comme les moteurs et alternateurs électriques, les IRM en médecine, les plaques chauffantes à induction, la lévitation magnétique, ...

Dans ce chapitre nous décrivons quelques propriétés des champs magnétiques et de leurs sources.

Propriétés du champ vectoriel

Définitions (1)

Un **champ** (vectoriel ou scalaire) est une propriété de l'espace qui permet en particulier de modéliser les interactions entre différents systèmes et qui doit rendre compte des observations expérimentales. En toute généralité, un champ se définit en un point M quelconque de l'espace et à un instant t quelconque, il dépend donc à la fois des coordonnées du point M et du temps t .

Définitions (2)

□ **Un champ uniforme** est un champ dont les caractéristiques sont les mêmes en tout point de l'espace considéré:

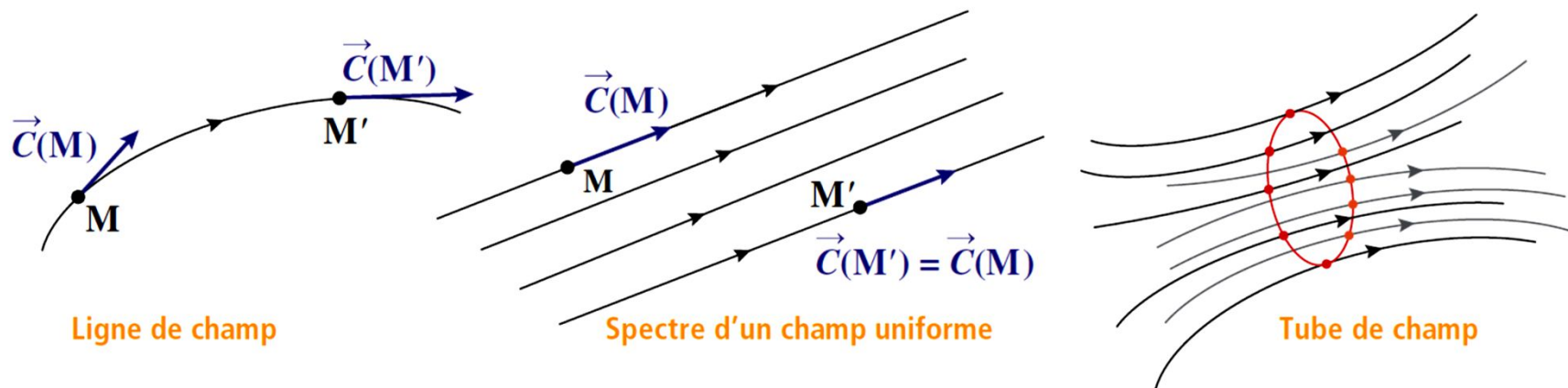
$$\forall (M, P) \in \text{espace considéré et } \forall t : \vec{C}(M, t) = \vec{C}(P, t)$$

□ **Un champ stationnaire** est un champ dont les caractéristiques sont indépendantes du temps:

$$\forall M \in \text{espace considéré et } \forall (t, t') : \vec{C}(M, t) = \vec{C}(M, t')$$

Définitions (3)

- Une **ligne de champ** d'un champ vectoriel est une courbe en tout point tangente au vecteur champ dans la zone d'espace considérée. Elle est orientée selon le sens du champ.
- Le **spectre** d'un champ vectoriel est l'ensemble de ses lignes de champ dans l'espace considéré.
- Un **tube de champ** est un faisceau de lignes de champ s'appuyant sur un contour fermé.



Définitions (4)

- ❑ La ligne de champ reste une courbe imaginaire (comme l'équateur ou l'orbite d'une planète), c'est un outil commode de visualisation.
 - ❑ La valeur du champ n'a aucune raison d'être identique tout le long de la ligne de champ.
 - ❑ Le spectre d'un champ uniforme est un ensemble de droites parallèles, puisque tous les vecteurs sont eux-mêmes parallèles entre eux.
 - ❑ Si le champ est stationnaire, le spectre n'évolue pas dans le temps, sinon il est susceptible de se modifier à chaque instant.
-

Définitions (5)

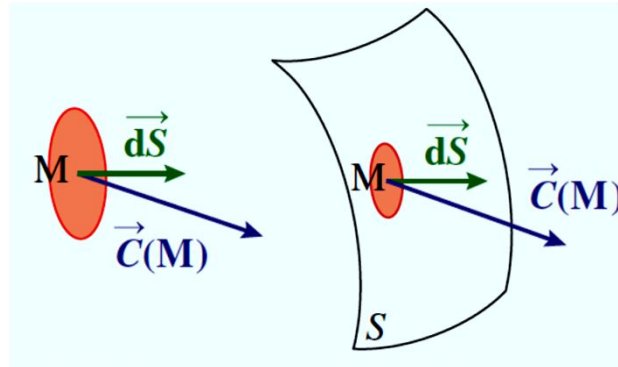
Le flux d'un vecteur à travers une surface élémentaire est le produit scalaire de ce vecteur par le vecteur surface, lequel est défini orthogonal à la surface et de valeur égale à la surface :

$$d\phi = \vec{C}(M, t) \cdot \vec{dS}$$

Sur une surface quelconque, le flux du vecteur est la somme des flux élémentaires:

$$\phi(t) = \iint_S d\phi = \iint_S \vec{C}(M, t) \cdot \vec{dS}$$

l'unité du flux dépend de la nature du champ étudié



Le champ magnétique

Définition

Un **champ magnétique** est un champ vectoriel susceptible d'exister en tout point de l'espace et qui dépend, en toute généralité, de la position et du temps. Son existence et ses propriétés doivent permettre de justifier les phénomènes magnétiques observés.

Le vecteur champ magnétique

Le champ magnétique en un point est caractérisé par son vecteur champ magnétique $\vec{B}(M, t)$

Direction : celle d'une aiguille magnétique

Sens : celui de la force magnétique sur le pôle Nord de l'aiguille

Intensité : d'autant plus grande que les forces magnétiques sur l'aiguille sont plus importantes.

Unité : le Tesla (T)

Ordres de grandeurs

Les champs magnétiques existent autour de nous, mais leur valeur dépend de leur utilisation et de leur source. On mesure l'intensité du champ magnétique à l'aide d'un teslamètre.

TABLE 32-1 Typical Values of Some Magnetic Fields*

<i>Location</i>	<i>Magnetic Field (T)</i>
At the surface of a neutron star (calculated)	10^8
Near a superconducting magnet	5
Near a large electromagnet	1
Near a small bar magnet	10^{-2}
At the surface of the Earth	10^{-4}
In interstellar space	10^{-10}
In a magnetically shielded room	10^{-14}

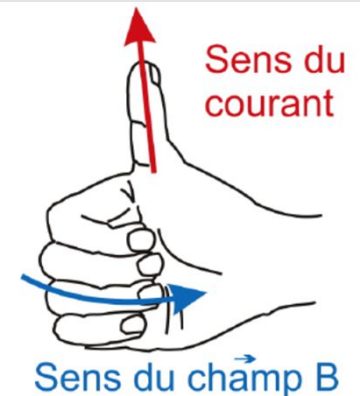
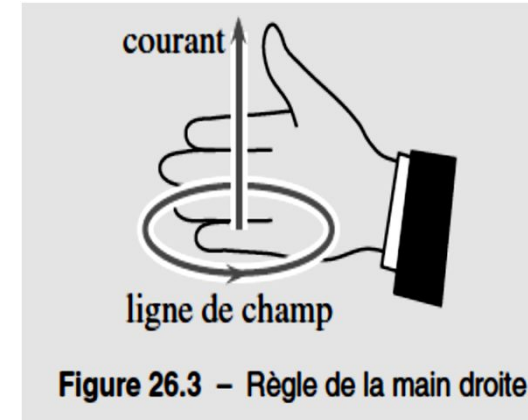
* Approximate values.

Topographie du champ magnétique (1)

□ Première propriété

Les lignes de champ du champ magnétique sont, dans la plupart des cas, des courbes fermées qui entourent les fils dans lesquels le courant électrique qui crée le champ magnétique passe. L'orientation de la ligne de champ et le sens du courant dans les fils sont liés par **la règle de la main droite** : si l'on met la main droite le long de la ligne de champ orientée de la base des doigts vers le bout des doigts, le pouce donne le sens du courant.

Cette propriété permet de savoir immédiatement, à l'observation d'une carte des lignes de champ magnétique, le lieu où il y a un courant qui passe et le sens du courant.



Topographie du champ magnétique (2)

□ deuxième propriété

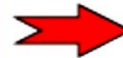
Dans une carte de champ magnétique, si l'on se déplace le long d'une ligne de champ, l'évolution de l'écartement de cette ligne avec les lignes de champ voisines est liée à l'évolution de la norme du champ magnétique. Si la norme du champ magnétique augmente, les lignes de champ voisines se rapprochent et inversement, si la norme du champ magnétique diminue, elles s'écartent. Ainsi, le champ magnétique est le plus intense, là où les lignes de champ sont les plus serrées.

Sur une carte des lignes de champ magnétique, le champ magnétique est plus intense là où les lignes de champ se resserrent et diminue dans les zones où elles s'évasent..

Sources de champ magnétique

Source: les charges en mouvement

- Charge libre possédant une vitesse dans un référentiel donné
- Courant électrique (écoulement de charges dans un conducteur)
 - Aimant. Il y a des courants électriques ordonnés dans la matière à l'échelle atomique: mouvement des électrons autour du noyau mais surtout le spin des électrons, c'est à dire leur « rotation » sur eux même



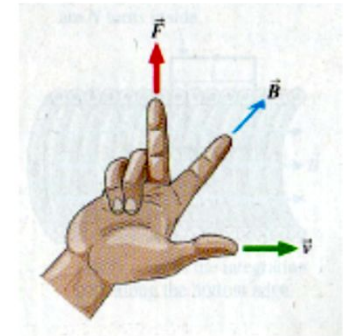
Production: Champ magnétique \vec{B}

(champ vectoriel)
en tout point de l'espace



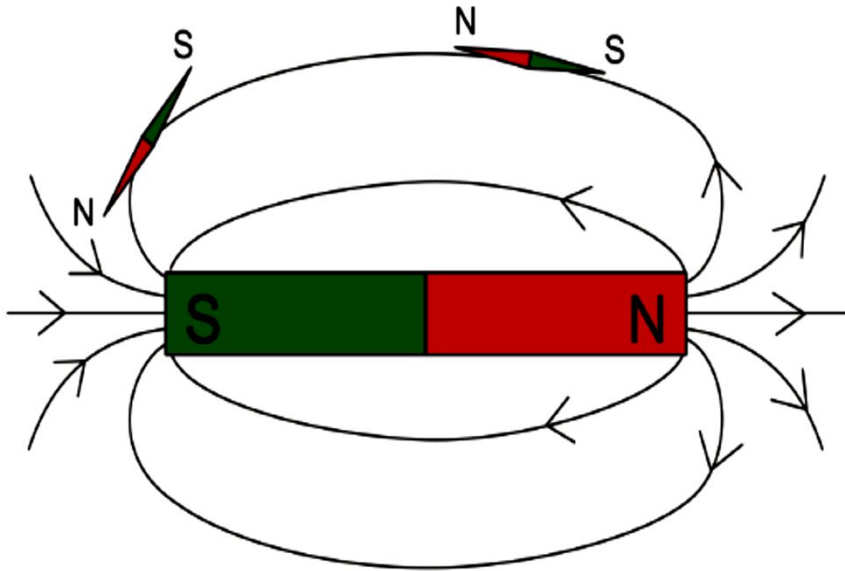
Effet: Force sur les particules chargées en mouvement

- Une particule de charge q , animée d'une vitesse \vec{v} , dans un référentiel donné, va subir la **force de Lorentz**: $\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$
- Un conducteur parcouru par un courant électrique va subir une force car chaque porteur de charge va subir la force de Lorentz
- Un aimant va aussi subir une force car il possède des courants à l'échelle atomique



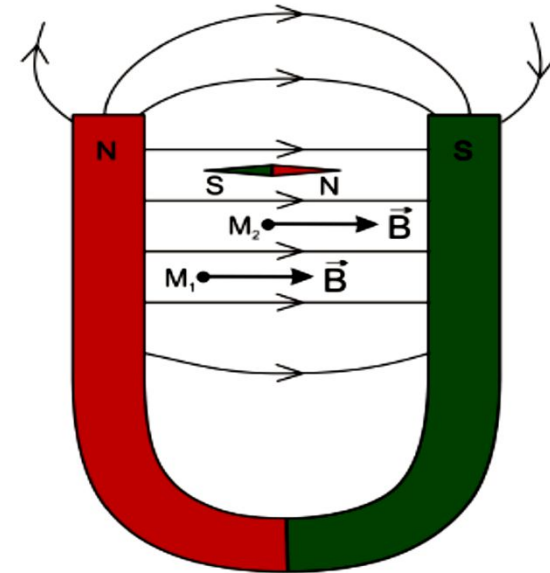
Spectres magnétiques (1)

Champ créé par un aimant droit



Les lignes sortent du pôle N et entrent par le pôle S.

Champ créé par un aimant en U



Entre les branches de l'aimant le vecteur \vec{B} est le même en tout point. Le champ magnétique \vec{B} y est **uniforme**.

Spectres magnétiques (2)

Figure 8.2 ▶

(a) La configuration de la limaille de fer autour d'un barreau aimanté. (b) Les lignes du champ magnétique d'un barreau aimanté. Les lignes forment des boucles fermées.

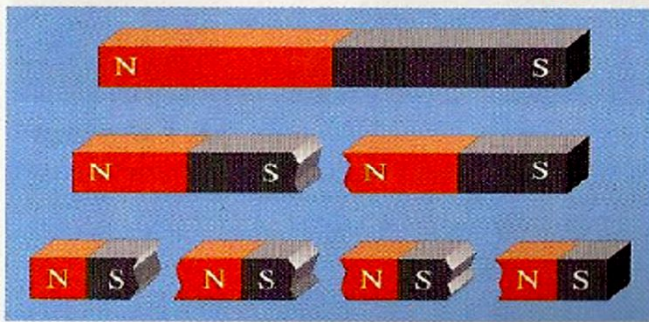
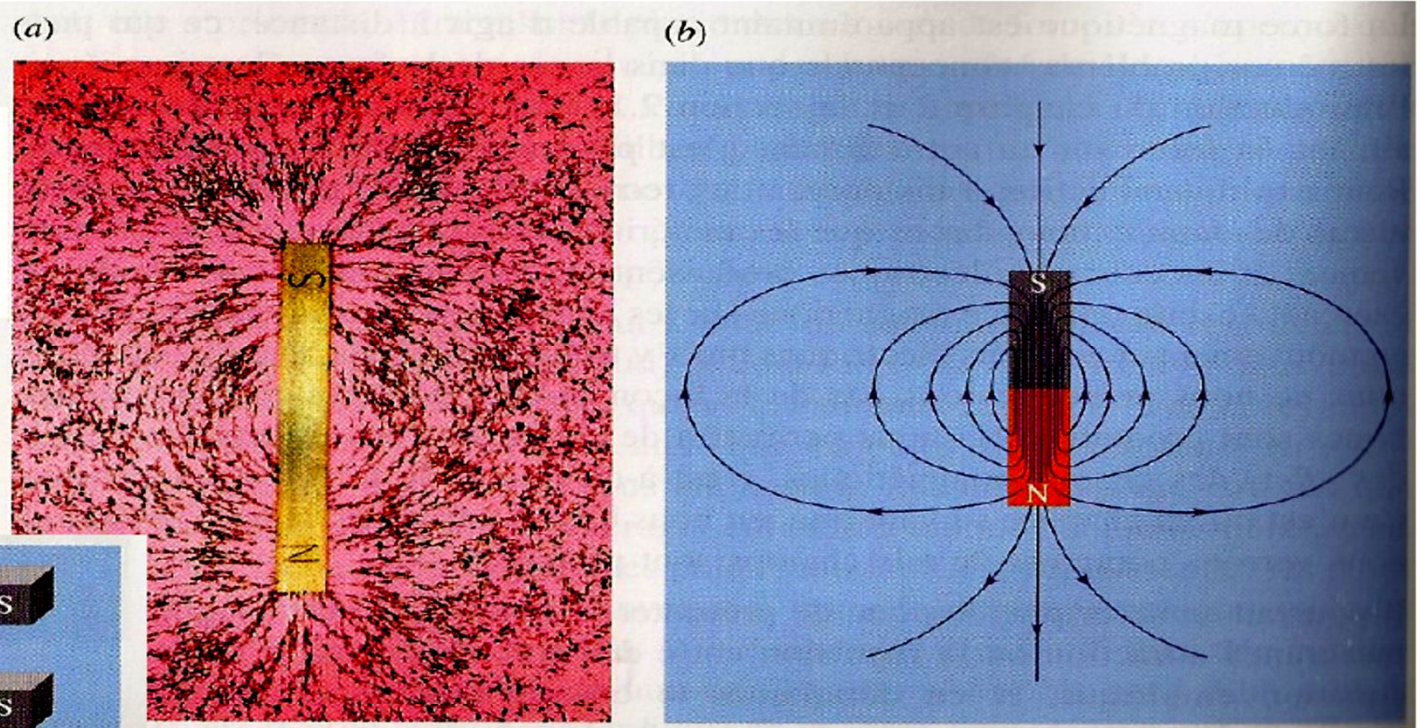
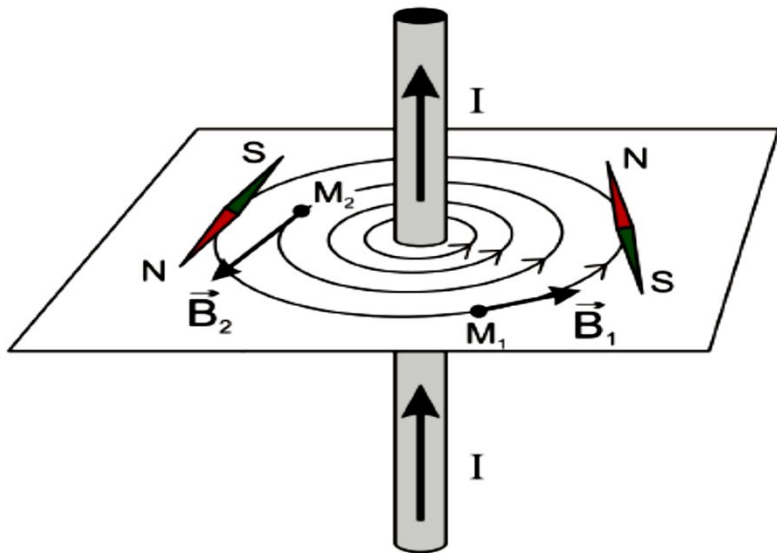


Figure 8.3 ▲

Lorsqu'on coupe un aimant, on obtient deux aimants plus petits. Il n'est pas possible d'isoler le pôle nord ou le pôle sud.

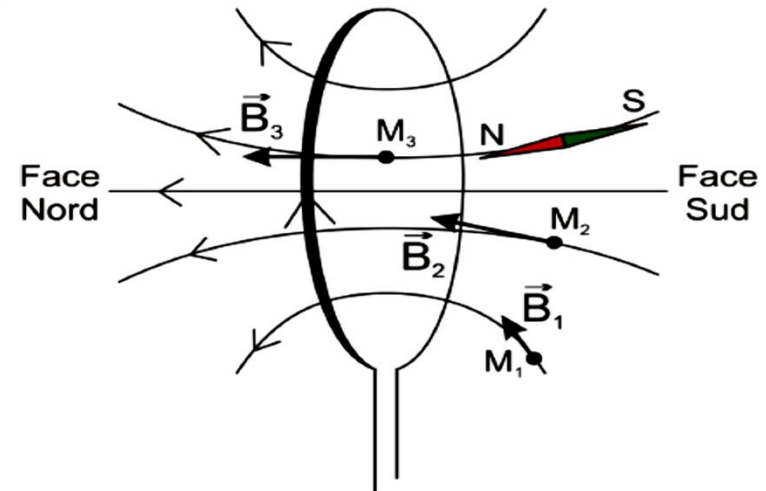
Spectres magnétiques (3)

Champ créé par un conducteur rectiligne parcouru par un courant d'intensité I



Il n'y a pas de pôles N ni S. Le sens de \vec{B} dépend du sens de I . L'intensité B du champ augmente avec l'intensité de courant et diminue avec la distance au conducteur.

Champ créé par un conducteur circulaire (bobine plate) parcouru par un courant d'intensité I



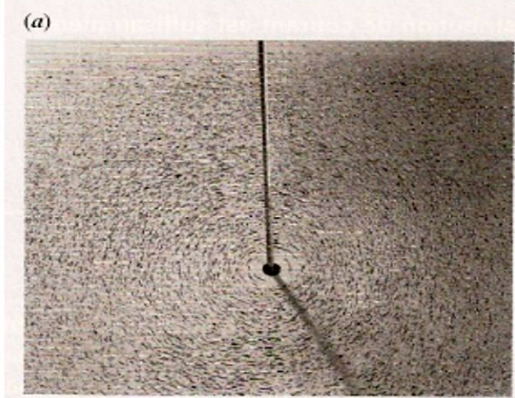
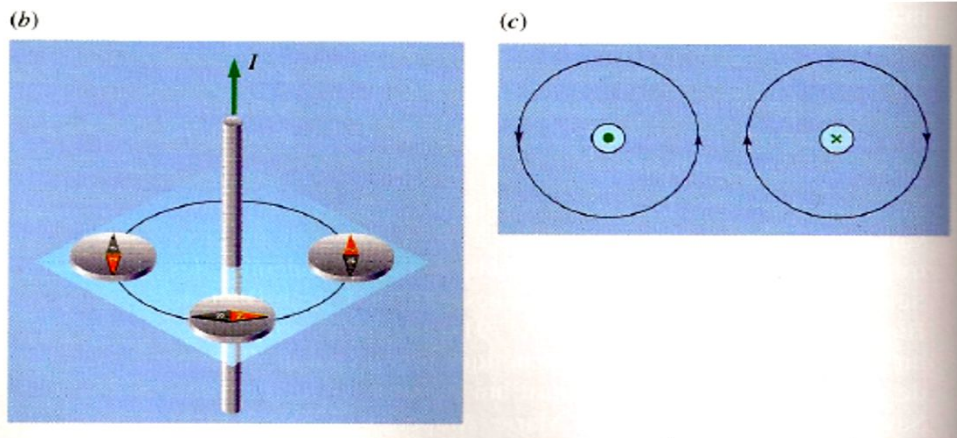
Toutes les lignes sortent par une face appelée **face nord** (N) et entrent par l'autre face appelée **face sud** (S). Le sens de \vec{B} dépend du sens de I . Le champ au centre est d'autant plus important que l'intensité de courant est plus élevée et que le rayon est plus petit.

Spectres magnétiques (4)

Fil conducteur rectiligne

Figure 9.1 ►

(a) La configuration de la limaille de fer autour d'un long conducteur rectiligne parcouru par un courant. Par définition, les lignes de champ suivent l'orientation de la limaille et ont donc la forme de cercles.
 (b) La forme circulaire des lignes de champ magnétique peut également être mise en évidence à l'aide d'une boussole.
 (c) Une des lignes de champ magnétique associée à un courant sortant de la page (point) et entrant dans la page (croix).



Boucle (spire) de courant

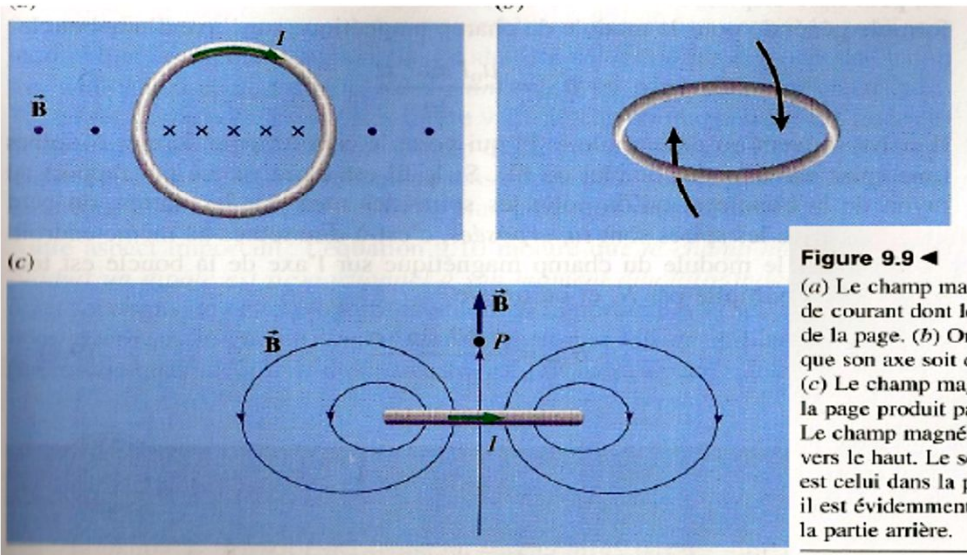


Figure 9.9 ◀

(a) Le champ magnétique d'une boucle de courant dont le plan coïncide avec le plan de la page. (b) On fait pivoter la boucle pour que son axe soit dans le plan de la page. (c) Le champ magnétique dans le plan de la page produit par la boucle de courant. Le champ magnétique au point P est vers le haut. Le sens du courant illustré est celui dans la partie *avant* de la boucle; il est évidemment vers la gauche dans la partie *arrière*.

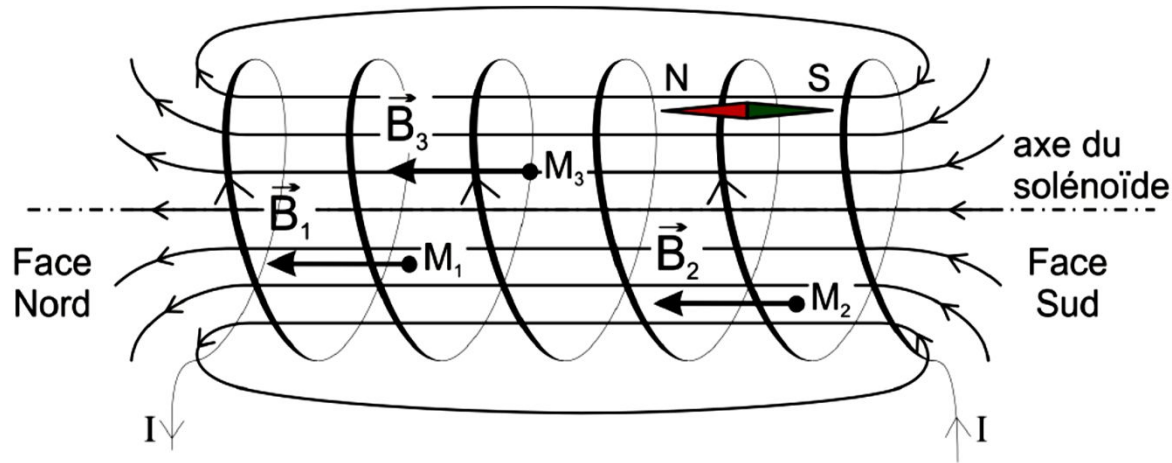


Figure 9.10 ◀

La configuration de la limaille de fer associée à une boucle parcourue par un courant.

Spectres magnétiques (5)

Champ créé par un solénoïde (bobine longue) parcouru par un courant d'intensité I



Le sens de \vec{B} dépend du sens de I .

À l'intérieur d'un solénoïde la champ est uniforme et d'intensité : $B = \mu_0 n I$

- μ_0 : perméabilité du vide : $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$
- n : densité de spires : $n = N/\ell$ avec ℓ la longueur du solénoïde et N le nombre de spires
- I : intensité du courant électrique traversant le solénoïde

Spectres magnétiques (6)

Sept spires

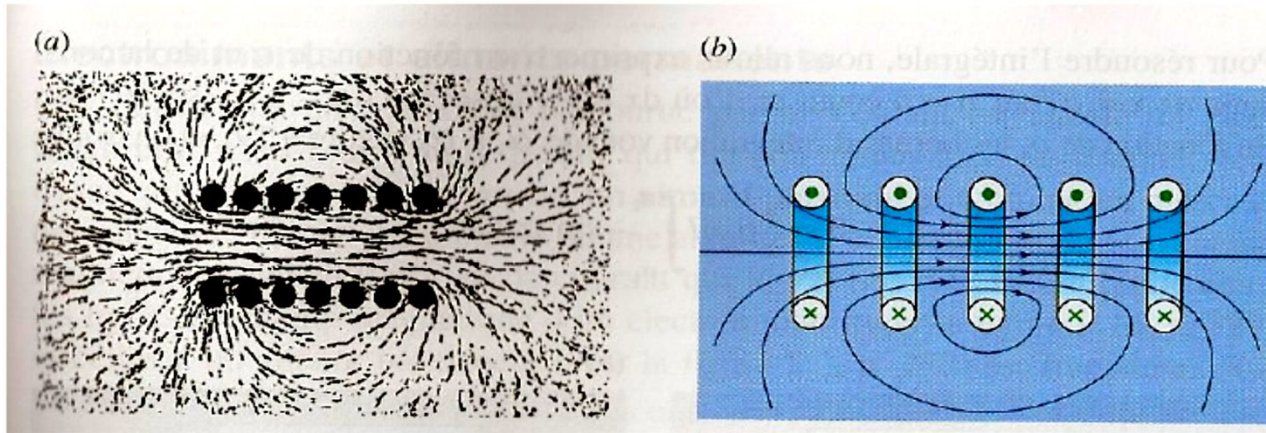


Figure 9.16 ◀

(a) La configuration de la limaille de fer dans le cas de sept spires. (b) Les lignes de champ magnétique dans le cas de cinq spires.

Solénoïde

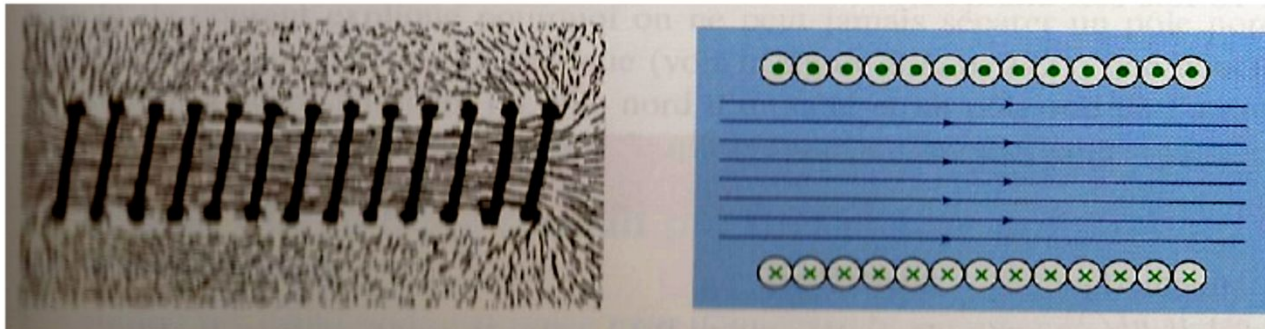


Figure 9.17 ◀

Le champ magnétique à l'intérieur d'un long solénoïde est uniforme. À l'extérieur, il est pratiquement nul.

Récapitulatif (1)

➤ Champ magnétique créé par un fil infini

Expression	Représentation	Spectre	Orientation dans (P)
$\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \vec{e}_\theta$ <p>Fil infini signifie que sa longueur est grande devant la distance à laquelle on étudie le champ.</p>			<p>Le courant pointe vers l'observateur, les lignes de champ sont orientées dans le sens trigonométrique.</p> <p>(P)</p>

➤ Champ magnétique créé par une spire ou une bobine plate (N spires)

Expression	Représentation	Spectre	Orientation dans (P)
$\vec{B}(M \in Oz) = \frac{\mu_0 i N \sin^3 \alpha}{2R} \vec{e}_z$ <p>M est un point de l'axe N est le nombre de spires Le champ garde le même sens tout au long de l'axe.</p>			<p>courant vers l'observateur lignes de champ dans le sens trigonométrique</p> <p>(P)</p> <p>courant vers le plan de figure lignes de champ dans le sens horaire.</p>

Récapitulatif (2)

➔ Champ magnétique créé par un solénoïde ou bobine de longueur L et de rayon R

Expression	Représentation	Spectre
$\vec{B}(M \in Oz) = \frac{\mu_0 n i (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)}{2} \vec{e}_z$ <p>M est un point de l'axe. $n = N/L$ est le nombre de spires par unité de longueur. L'orientation est comparable à celle de la bobine plate.</p>		

➔ Champ magnétique créé par un solénoïde infini

Expression	Représentation	Spectre
$\vec{B}_{\text{intérieur}} = \mu_0 n i \vec{e}_z \quad \vec{B}_{\text{extérieur}} = \vec{0}$ <p>n est le nombre de spires par mètre infini = longueur très grande devant le rayon et M loin du bord.</p>		

Champ magnétique terrestre (1)

Le champ magnétique terrestre est approximativement assimilable à celui d'un aimant droit placé au centre de la Terre (et dont l'axe est incliné d'un faible angle par rapport à l'axe de rotation). Le pôle magnétique Sud se trouve à proximité du pôle géographique nord. De même **le pôle magnétique Nord** se trouve près **du pôle géographique sud**.

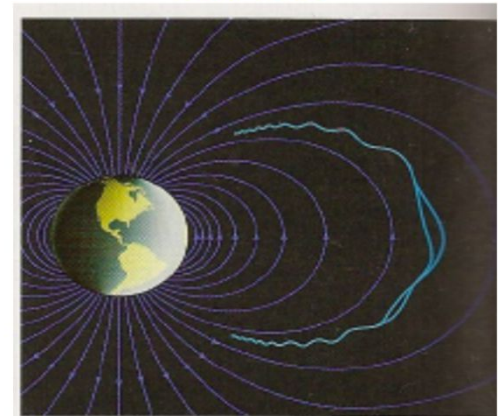
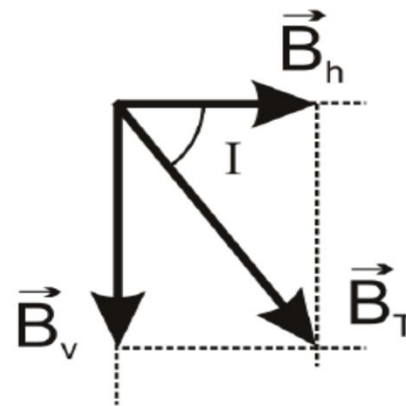
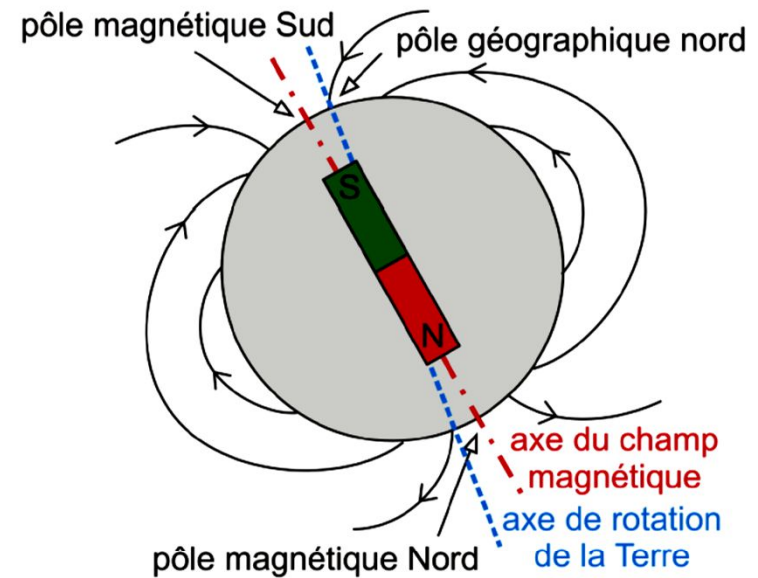


Figure 8.29 ▲
Les protons et les électrons de l'espace sont confinés par le champ magnétique terrestre.

Champ magnétique terrestre (2)

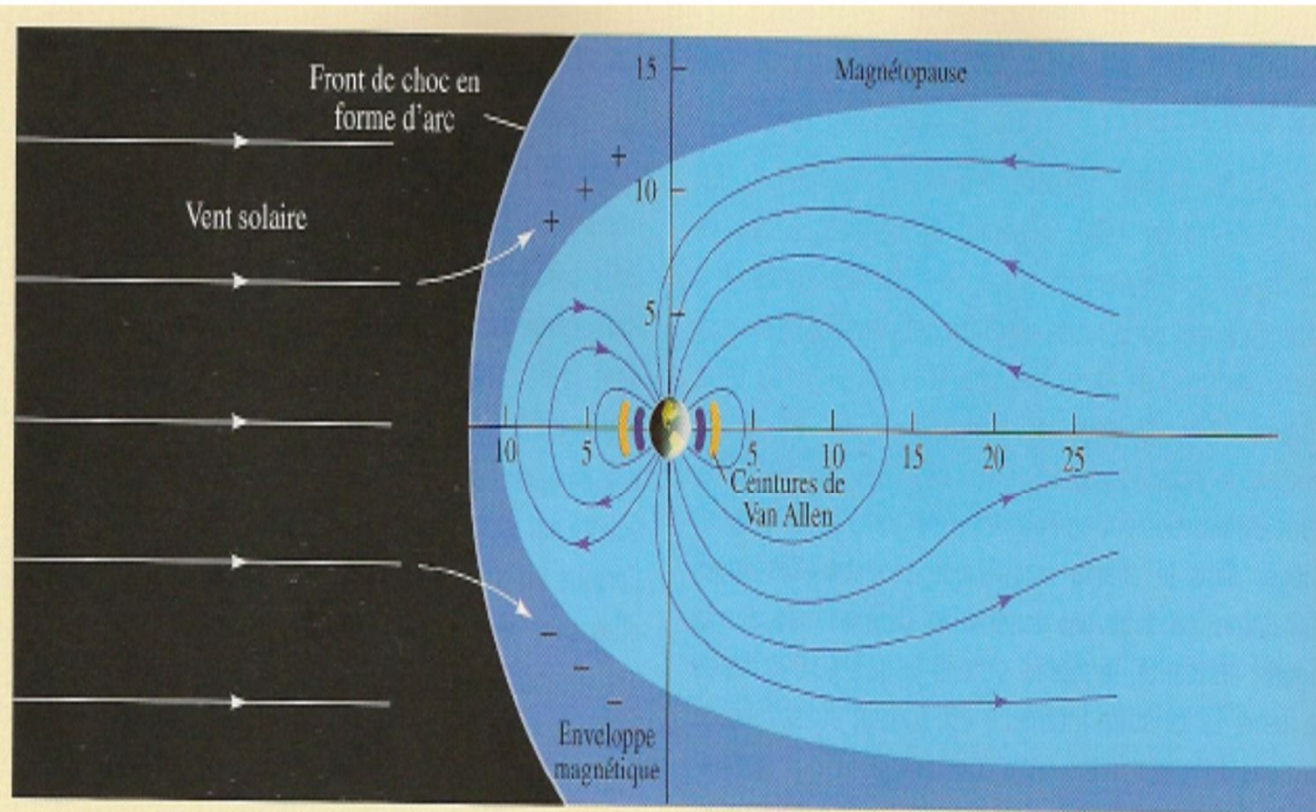
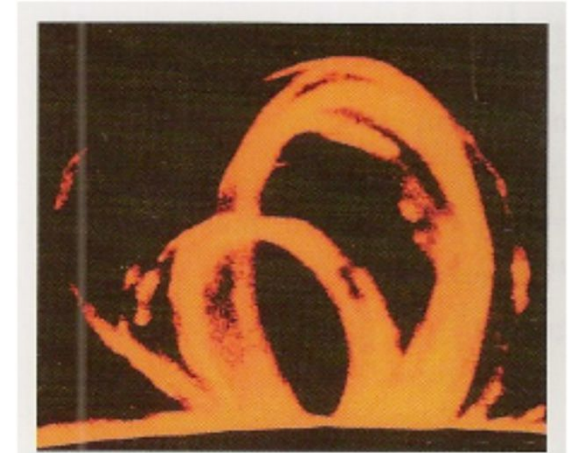


Figure 9.49 ▲

Le champ magnétique terrestre observé à grande échelle est très différent de celui d'un dipôle. La déformation est créée par le « vent solaire », qui est un flux de particules chargées émanant du Soleil.



La forme de ces éruptions solaires montre qu'une force centripète agit sur elles. La seule façon d'expliquer cela est de concevoir que le Soleil produit un puissant champ magnétique.

Moment magnétique

Vecteur surface

Définition Tout d'abord on choisit un sens positif pour le contour de la surface.

Les caractéristiques du vecteur surface \vec{S} sont :

- **point d'application** : le centre de la surface
- **direction** : perpendiculaire à la surface
- **sens** : déterminé par la règle de la main droite : les doigts courbés indiquent le sens positif et le pouce indique le sens de \vec{S}
- **norme** : la valeur S de la surface (en mm^2)

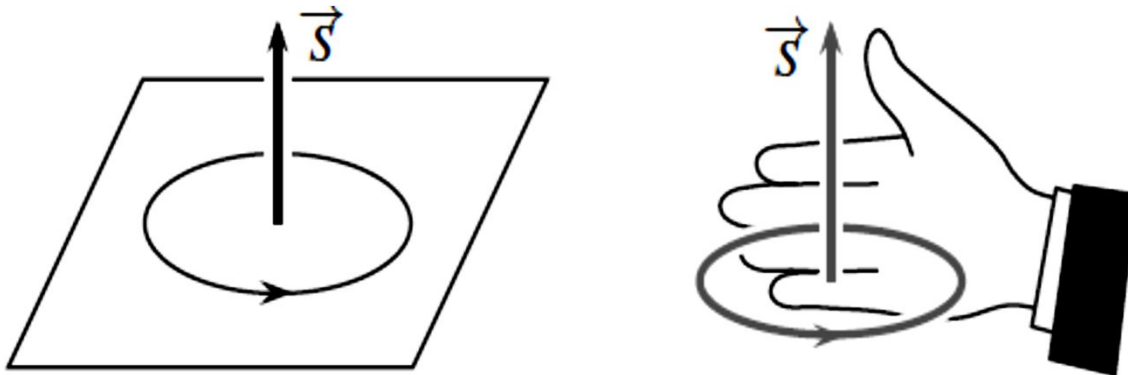


Figure 26.11 – Surface orientée et vecteur surface.

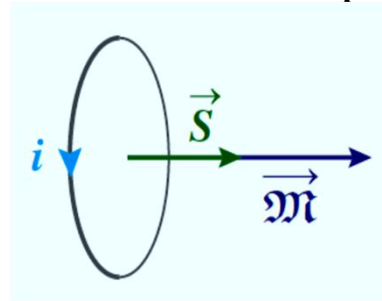
$\vec{S} = S \vec{n}$ est un vecteur unitaire perpendiculaire au plan de S , donc à \mathbf{S} .

Dipôle magnétique

Un **dipôle magnétique** est une petite spire plane de surface S parcourue par un courant d'intensité i , dont on observe le champ magnétique à grande distance.

On caractérise le dipôle par son **moment magnétique** :

$$\vec{\mathcal{M}} = i \vec{S} = iS \vec{n}$$



où le vecteur surface est orienté dans le sens direct par rapport au sens du courant.

La valeur du moment magnétique s'exprime en $A \cdot m^2$.

Quelques valeurs de moment magnétique:

$$\mathcal{M}_{Terre} = 8 \cdot 10^{22} A \cdot m^2$$

$$\mathcal{M}_{aimant\ moyen} = 10 A \cdot m^2$$

$$\mathcal{M}_{neutron} = 1 \cdot 10^{-26} A \cdot m^2$$

$$\mathcal{M}_{proton} = 1,4 \cdot 10^{-26} A \cdot m^2$$

Lignes du moment magnétique

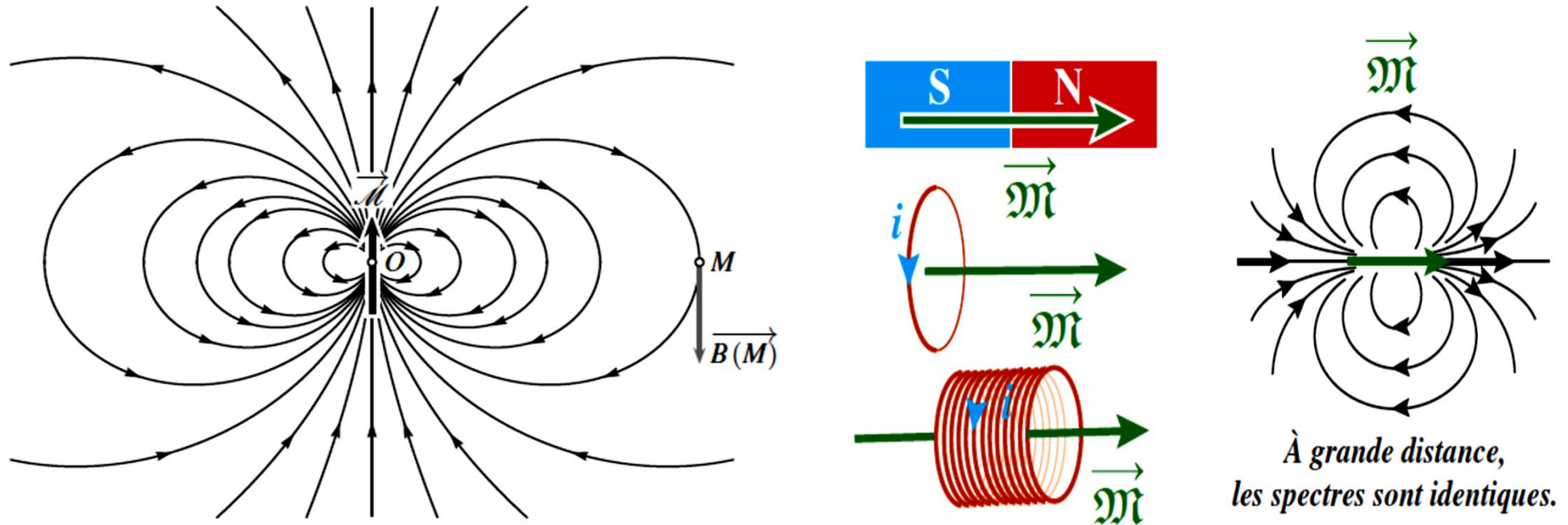


Figure 26.12 – Lignes de champ magnétique d'un moment magnétique.

La distance OM est très supérieure à la longueur caractéristique de la source modélisée par le moment magnétique $\vec{\mathcal{M}}$ comme le rayon d'une spire, le rayon ou la longueur d'une bobine ou d'un aimant. Ainsi, la source n'est pas représentée car totalement concentrée au point O .

Point Méthode & Exos d'applications

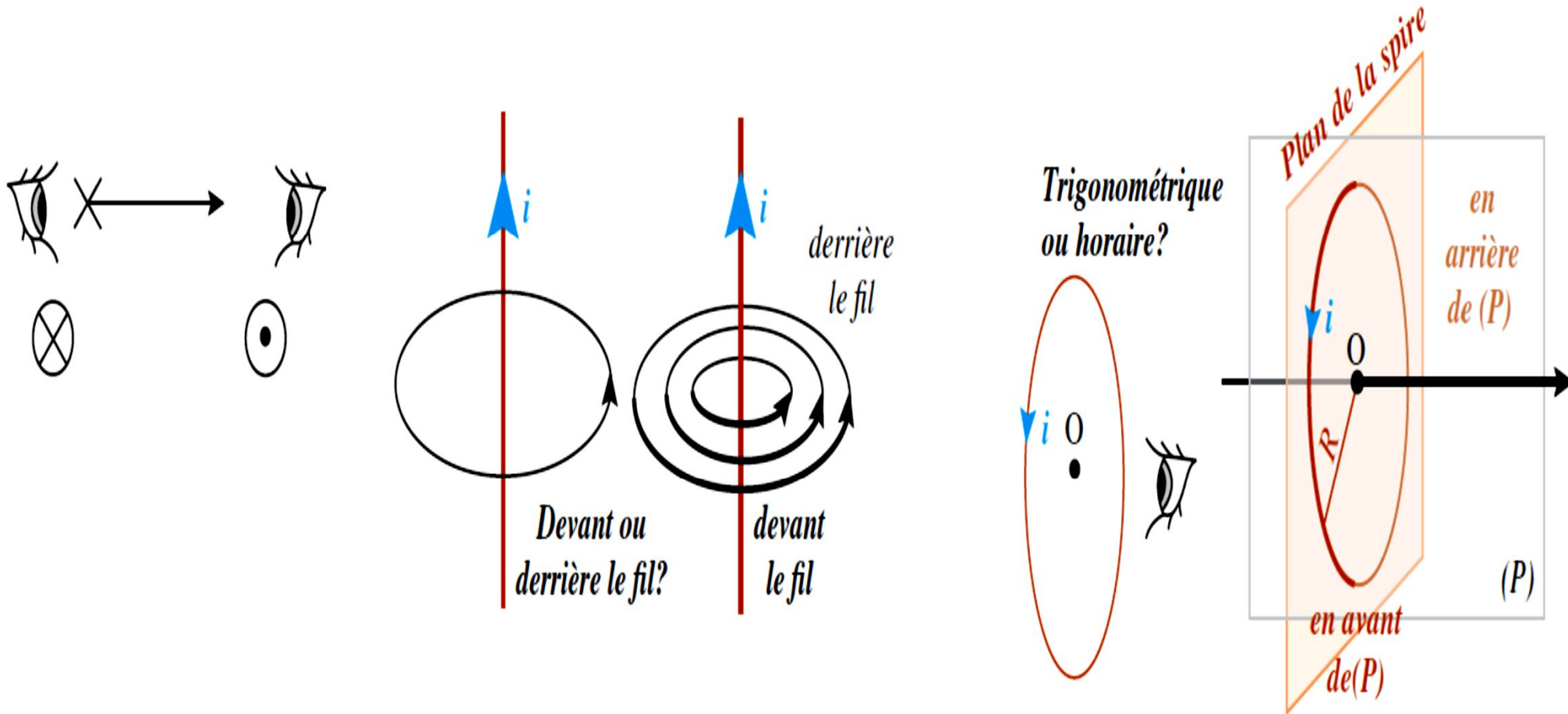
Représenter le champ magnétique (1)

□ La **représentation des sources, des champs, des lignes de champ** doit toujours être sans ambiguïté, en raison de l'importance de l'orientation selon la convention directe. De même, **l'orientation du courant**, qui traduit son algébrisation, est essentielle et doit toujours figurer sur les schémas. Enfin, la connaissance et la représentation des bases des différents systèmes de coordonnées sont ici indispensables.

Représenter le champ magnétique (2)

□ On utilisera avantageusement la représentation maintenant familière, rappelée ci-dessous pour un schéma plan. Pour un schéma en 3D, on fera apparaître en trait plus épais ce qui est en avant par rapport à ce qui est en arrière de la perspective, comme sur le schéma ci-dessous. **On n'hésitera pas non plus à mettre en évidence un plan utile (symétrie, circuit...). Les schémas y gagneront en clarté, et les résolutions d'exercices en efficacité.**

Représenter le champ magnétique (3)



Analyse d'une carte 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.

Cf 2^e année : c'est une conséquence du fait que \vec{B} est à flux conservatif.

■ Lignes de champ des aimants

- Les lignes de champ magnétique d'un aimant quittent le pôle nord de l'aimant et entrent par le pôle sud.

■ 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.
- Le sens des lignes de champ magnétique est imposé par la règle de la main droite :
 - le courant entre par la base des doigts et le pouce donne le sens du champ magnétique
 - ou le courant entre par la base du pouce et les quatre autres doigts donnent l'orientation des lignes de champ qui entrent par la base des doigts.

À retenir : Cartes de champ magnétique (1)

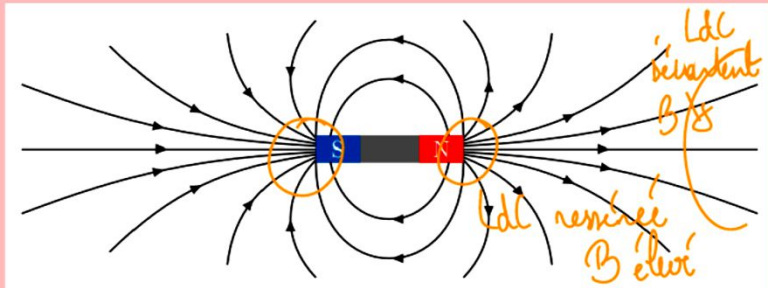


FIGURE 1 – Aimant droit

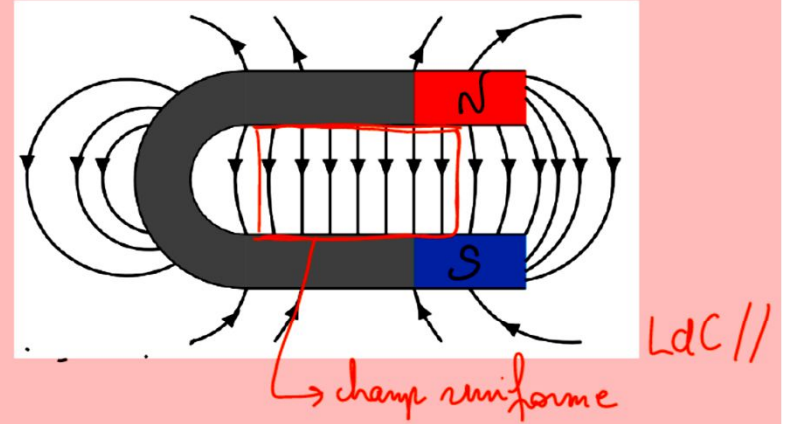


FIGURE 2 – Aimant en U

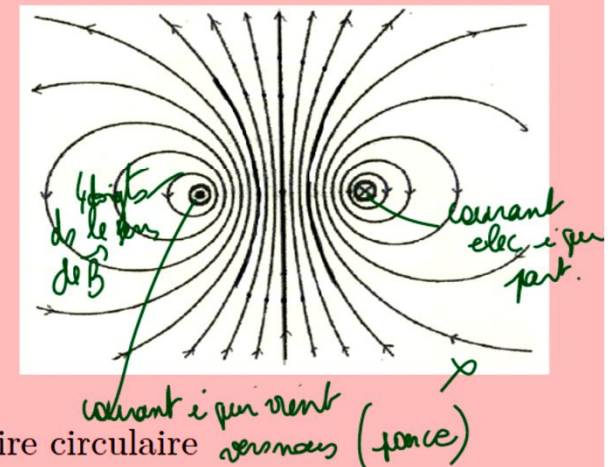
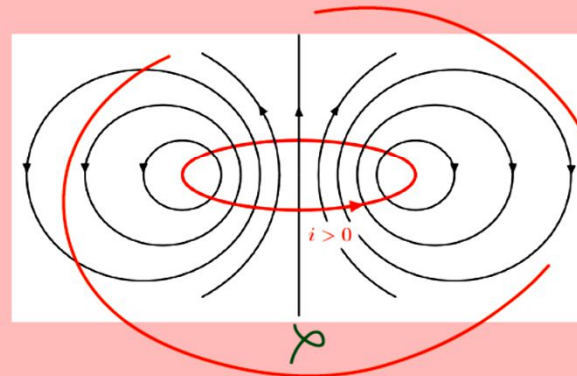
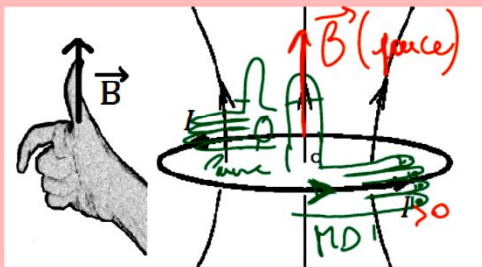


FIGURE 3 – Carte de champ magnétique d'une spire circulaire

À retenir : Cartes de champ magnétique (2)

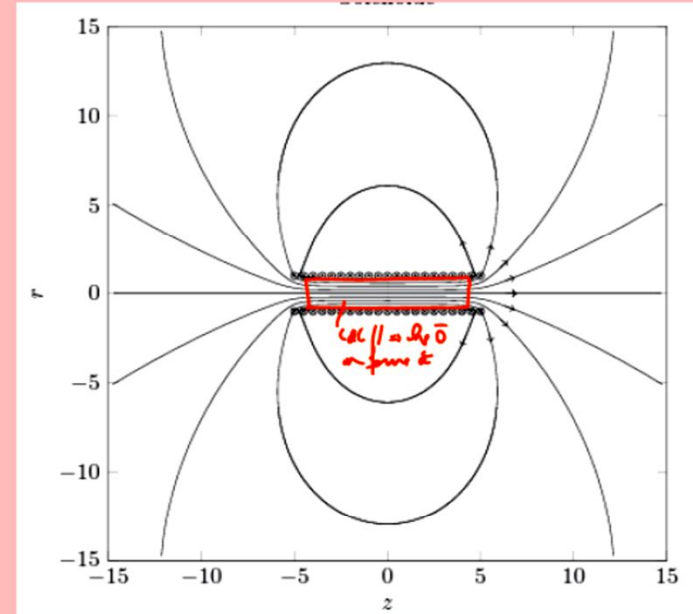
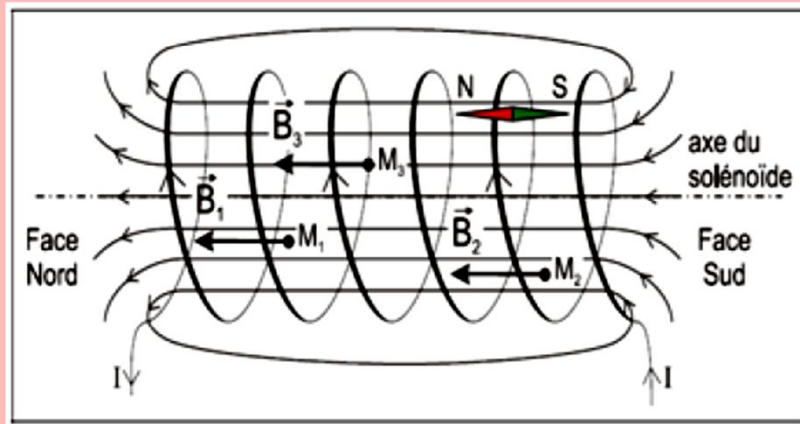


FIGURE 4 – Carte de champ magnétique d'une bobine longue *longueur \gg rayon*

À retenir : Cartes de champ magnétique (3)

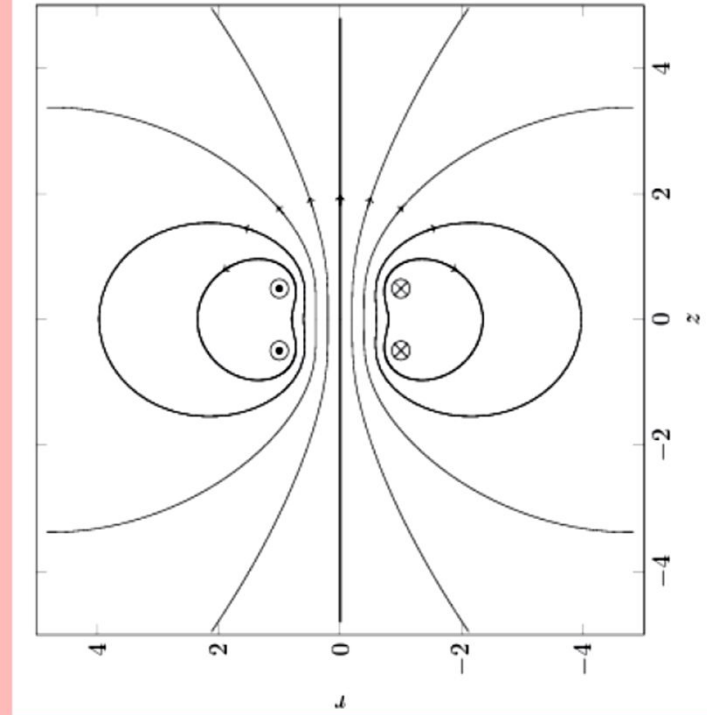
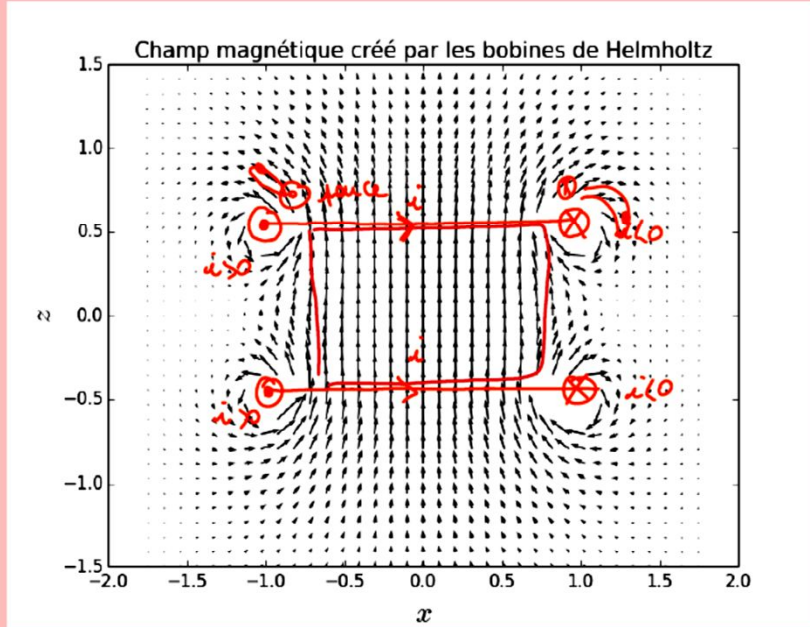
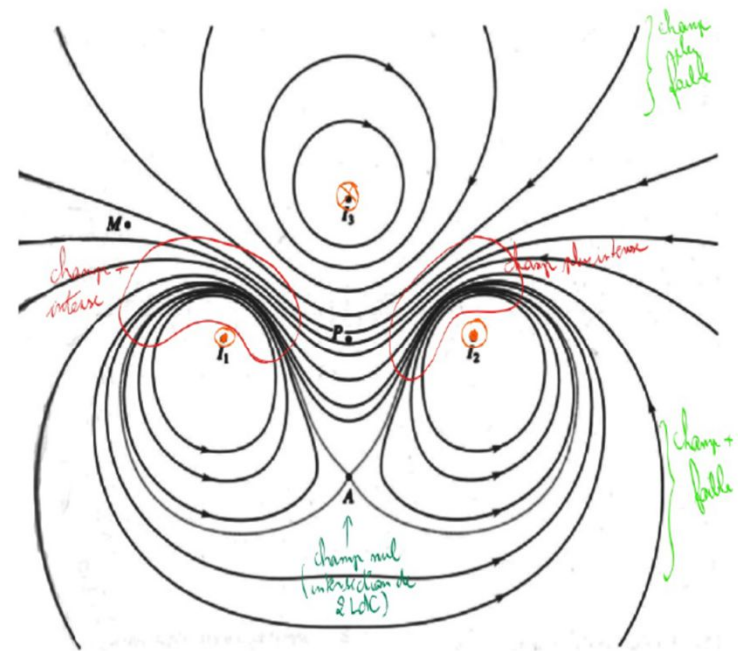
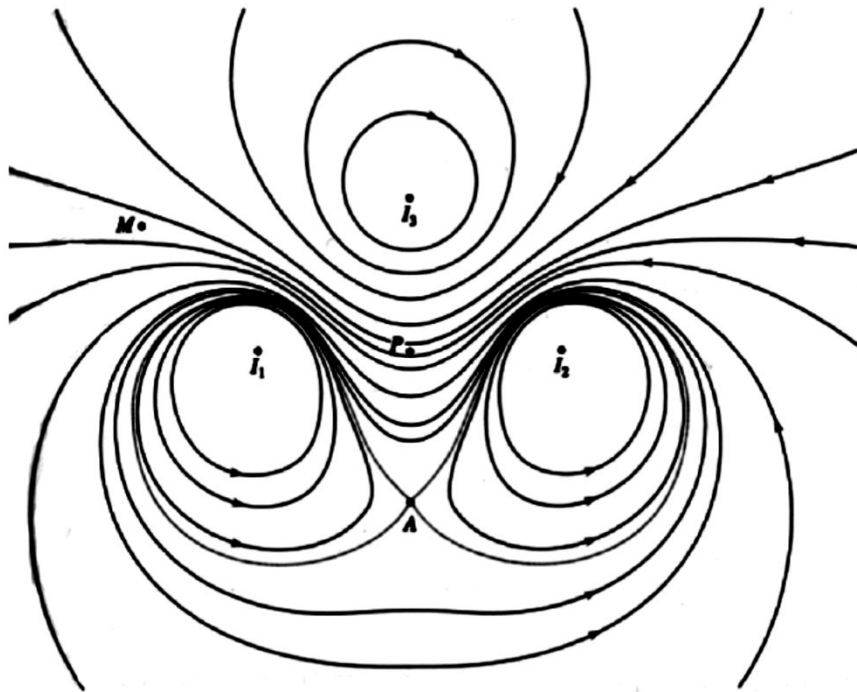


FIGURE 5 – Carte de champ magnétique des bobines de Helmholtz :
2 bobines plates identiques, parcourues par des courants I identiques, l'une à côté de l'autre en configuration de Helmholtz c'est-à-dire que la distance d les séparant est égale au rayon R de chacune des bobines.

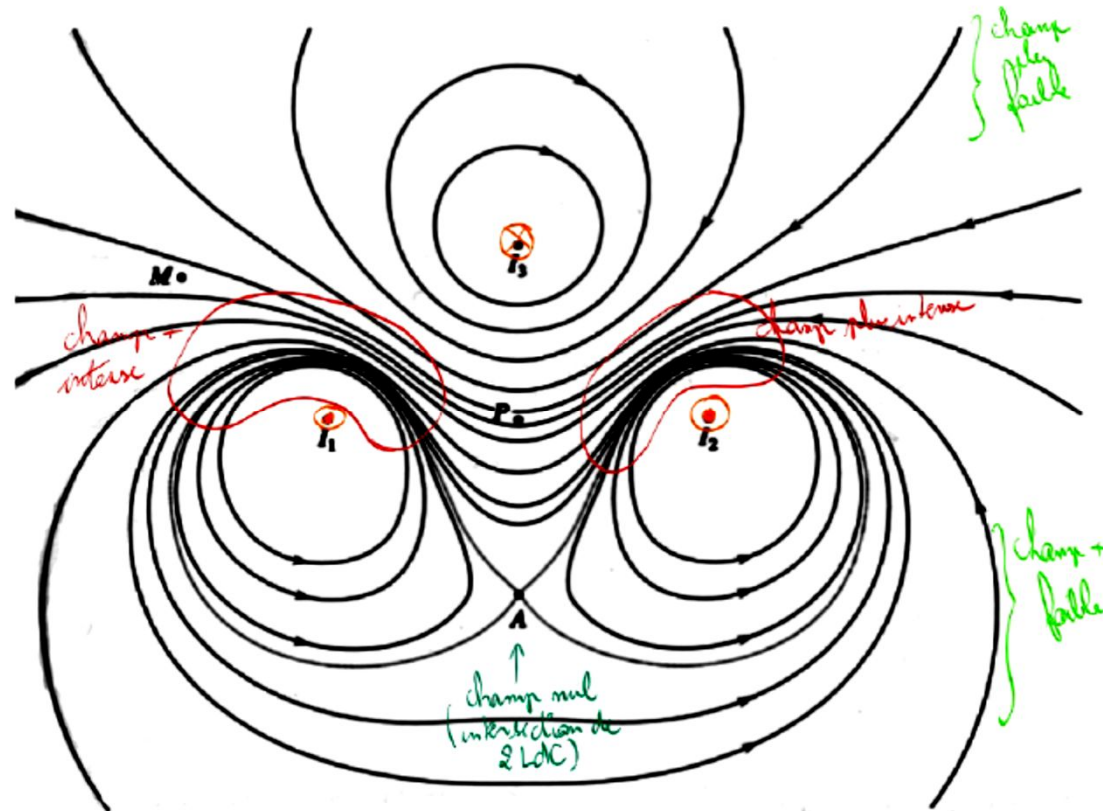
Exercices d'applications (1)

Sur la carte de champ ci-dessous, identifier le sens des courants, les zones de champs forts et les zones de champs faible.



Exercices d'applications (2)

Solution



Exercices d'applications (3)

Le champ créé en tout point de l'espace par un fil infini parcouru par un courant d'intensité I s'écrit, en utilisant le système de coordonnées cylindriques d'axe (Oz) selon l'axe du fil :

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

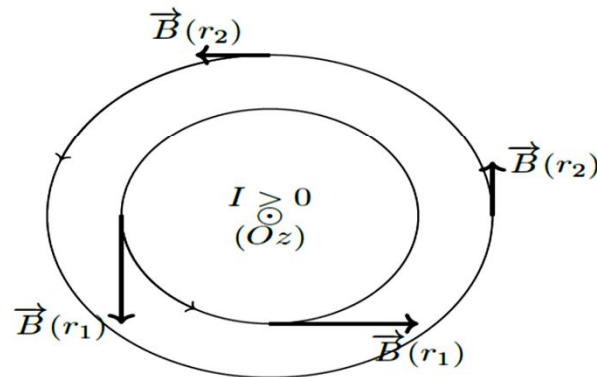
- Q1. Représenter les lignes de champ.
- Q2. Comment évolue la norme du champ magnétique avec l'intensité I ? Lorsqu'on s'éloigne du fil ?
- Q3. Calculer le champ créé par un courant de 1 Ampère à 10 cm du fil.
-

Exercices d'applications (4)

R1. Représenter les lignes de champ.

Solution:

Les lignes de champ sont des courbes tangentes en chaque point au vecteur champ magnétique en ce point. Le vecteur champ magnétique est porté par \vec{u}_θ . La courbe tangente en chaque point à \vec{u}_θ est le cercle. Ainsi, les lignes de champ sont des cercles d'axe (Oz) .



R2. Comment évolue la norme du champ magnétique avec l'intensité I ? Lorsqu'on s'éloigne du fil?

Solution: La norme du champ magnétique est proportionnelle à l'intensité du courant électrique.

La norme du champ magnétique ne dépend que de la distance au fil.

La norme du champ magnétique est inversement proportionnelle à la distance à partir du fil.

R3. Calculer le champ créé par un courant de 1 Ampère à 10 cm du fil.

Solution:

$$\text{A.N. : } \|\vec{B}\| = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \times 1}{2\pi \times 0,1} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

Exercices d'applications (5)

Le champ magnétique créé à l'intérieur d'une bobine longue (de longueur très grande devant son rayon), de n spires par unité de longueur, parcourue par un courant électrique d'intensité I vaut, en norme : $B = \mu_0 n |I|$.

Q1. Faire un schéma sur lequel vous représentez la bobine longue parcourue par le courant I et le champ magnétique ainsi créé. **On fera attention au sens du champ par rapport à celui du courant.**

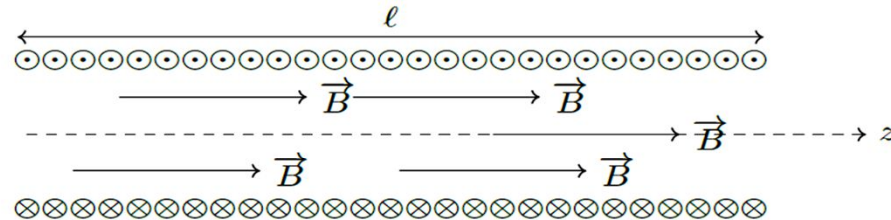
Q2. Calculer le champ créé par une bobine contenant $N = 500$ spires, de longueur $\ell = 5 \text{ cm}$, dans laquelle circule une intensité $I = 1 \text{ A}$.

Q3. Comment peut-on augmenter le champ magnétique ? Quels peuvent être les problèmes rencontrés ?

Exercices d'applications (6)

- R1. Faire un schéma sur lequel vous représentez la bobine longue parcourue par le courant I et le champ magnétique ainsi créé. **On fera attention au sens du champ par rapport à celui du courant.**

Solution: Le champ magnétique est uniforme en tout point à l'intérieur de la bobine longue, et est porté par le vecteur \vec{u}_z . Le sens de \vec{B} est donné par la règle de la main droite.



- R2. Calculer le champ créé par une bobine contenant $N = 500$ spires, de longueur $\ell = 5$ cm, dans laquelle circule une intensité $I = 1$ A.

Solution:

A.N. : $B = n\mu_0 I = \frac{N}{\ell} \mu_0 I = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ T} \approx 10^{-2} \text{ T}$

- R3. Comment peut-on augmenter le champ magnétique ? Quels peuvent être les problèmes rencontrés ?

Solution: Pour augmenter le champ magnétique, il faut soit augmenter le nombre de spires par unité de longueur, cela peut se faire en augmentant le nombre de couches de fils bobinés.

On peut également augmenter l'intensité du courant circulant dans les fils. Les fils conducteur ayant une résistance, ils s'échauffent par effet Joule, et peuvent fondre si le courant est trop important. La résistance est inversement proportionnelle à la section du fil (pensez aux embouteillages!), la solution est d'augmenter la section : cela a un coût (le cuivre n'est pas donné!) et ça a un poids!