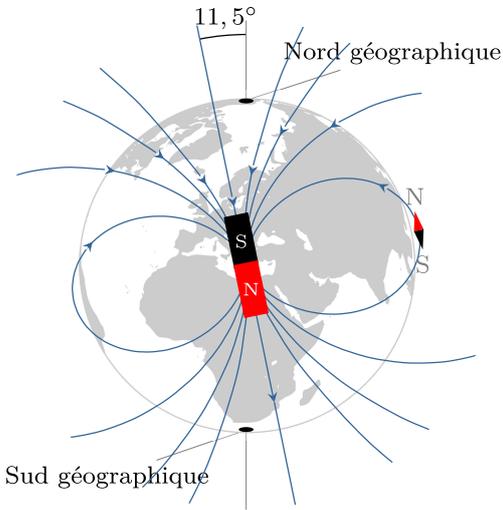




Thème I. Ondes et signaux (Induction)

Chapitre n°21 Champ magnétique



Au cours du moyen-âge, on a constaté qu'une aiguille aimantée susceptible de tourner librement sur un axe vertical prenait une direction privilégiée proche de celle d'un méridien appelée l'axe géomagnétique (incliné de $11,5^\circ$ par rapport à l'axe de rotation de la Terre). Cela a conduit à l'appellation « nord » et « sud » des extrémités d'un aimant.

Vidéo très intéressante : <https://youtu.be/FRteNtwuaWg> de 19 :50 à 37 :30.

Objectifs du chapitre

L'objectif de ce chapitre est d'introduire la notion de champ magnétique, et d'en décrire les propriétés.

En effet, tous les systèmes (moteurs, haut-parleur, plaques à induction, ...) décrits dans l'introduction que nous allons étudier dans les chapitres suivants mettent en jeu un phénomène d'induction qui se produit en présence de champs magnétiques.

Plan du cours

I Le champ magnétique 2

I.1	Notion de champ	2
I.2	Sources du champ magnétique	2
I.2.a)	La Terre	2
I.2.b)	Aimants	2
I.2.c)	Courants électriques	3
I.2.d)	Ordres de grandeur	3
I.3	Cartes de champ magnétique	3

II Symétries du champ magnétique 6

II.1	Symétries	6
II.2	Conséquences des symétries sur \vec{B}	7
II.3	Invariances	8
II.4	Forme générale de \vec{B}	9

III Moment magnétique 11

III.1	Vecteur surface	11
III.2	Moment magnétique d'une boucle plane	11
III.3	Moment magnétique d'un aimant permanent	12

Ai-je bien appris mon cours ?

- 1 – 😊 – 😞 – Tracer l'allure des cartes de champ magnétique pour un aimant droit, une spire circulaire et une bobine longue.
- 2 – 😊 – 😞 – Comment peut-on réaliser un champ magnétique quasi-uniforme ?
- 3 – 😊 – 😞 – Donner les ordres de grandeur de champs magnétiques au voisinage d'un aimant usuel, dans un appareil à IRM et du champ magnétique terrestre.
- 4 – 😊 – 😞 – Donner les quatre phrases qui donnent les conséquences des symétries de la distribution de courant sur le champ magnétique. Associer ces phrases à des schémas illustratifs.
- 5 – 😊 – 😞 – Définir les invariances d'une distribution de courant, et en donner les conséquences sur le champ magnétique.
- 6 – 😊 – 😞 – Définir le vecteur surface associé à une boucle de courant plane.
- 7 – 😊 – 😞 – Définir le moment magnétique associé à une boucle de courant plane.
- 8 – 😊 – 😞 – Donner l'ordre de grandeur du moment magnétique associé à un aimant usuel.

I Le champ magnétique

I.1 Notion de champ



Définition : Champ

- Un **champ** est associé à une propriété physique qui se manifeste en tout point de l'espace et à tout instant. Cette propriété est définie par une grandeur physique qui est une fonction de l'espace et du temps.
- On parle de **champ scalaire** lorsque la grandeur physique le représentant est une grandeur scalaire.
Ex : pression, température au sein d'un fluide, concentration volumique d'un constituant ...
On remarque sur ces exemples que les grandeurs correspondantes sont intensives.
- On parle de **champ vectoriel** lorsque la grandeur physique le représentant possède une valeur, une direction, un sens ; la grandeur est alors notée sous forme d'un vecteur.
Ex : champ de pesanteur, champ de vitesse d'un solide en rotation, champ gravitationnel, champ magnétique...
- 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.
- Un champ est dit **uniforme** s'il est indépendant de la position : la grandeur physique est la même en tout point, à t donné.
Ex : le champ de pesanteur terrestre \vec{g} est statique et est uniforme sur des zones d'altitudes proches.

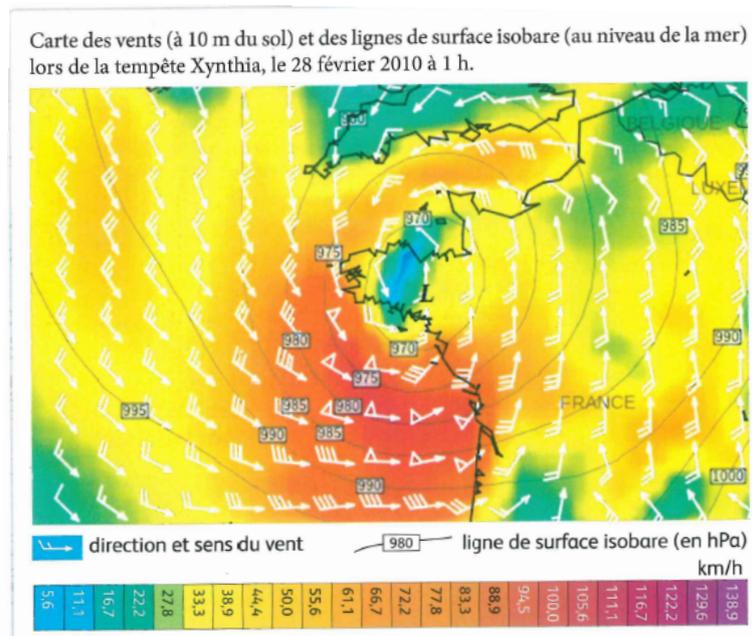


FIGURE 1 – Carte de champ en météo : vitesse du vent et pression

I.2 Sources du champ magnétique

Pour visualiser le champ magnétique créé par différents dispositifs (aimant et courants) :

http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Elec/Champs/topoB.php

I.2.a) La Terre

La Terre est la source d'un champ magnétique.

Vidéo très intéressante à ce sujet : https://youtu.be/TEp_9-ycjdI?si=xxLyY-mFVBhekEyc

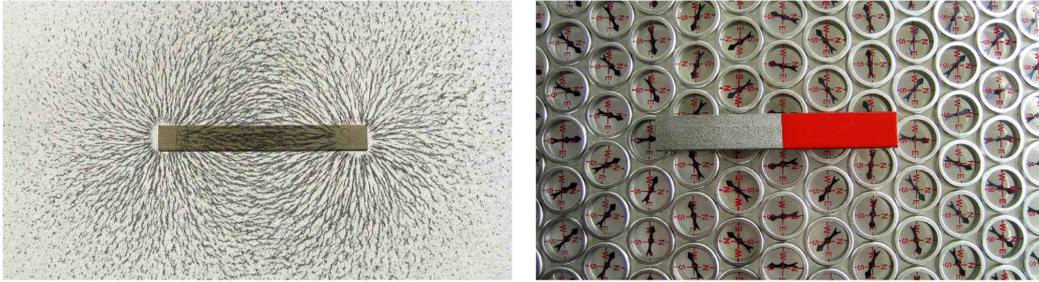
I.2.b) Aimants

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**. C'est-à-dire qu'il possède un **pôle Nord** et un **pôle Sud**. Si un aimant est brisé, chacun des éclats aura à nouveau deux pôles. On observe que :

- le pôle Nord d'un aimant et le pôle Sud d'un autre aimant s'attirent ;
- les deux pôles de même polarité de deux aimants se repoussent

On peut visualiser le champ magnétique d'un aimant en disposant à sa proximité de la limaille de fer, c'est-à-dire de minuscules bouts de fil de fer. On constate que la limaille de fer dispose selon une géométrie particulière. Les copeaux de fer semblent former une ligne continue allant d'un pôle à un autre. 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.



1.2.c) Champs magnétiques créés par des courants

Capacité exigible : Évaluer l'ordre de grandeur d'un champ magnétique à partir d'expressions fournies.

On constate qu'un circuit électrique parcouru par un courant électrique modifie également l'orientation de la limaille de fer et l'orientation d'une boussole. **Un courant électrique crée également un champ magnétique.**

En deuxième année, vous apprendrez à établir l'expression des champs magnétiques créés par des courants avec le théorème d'Ampère.

♥ À retenir : Champ magnétique créé par un courant électrique

Un champ magnétique créé par un courant électrique est toujours proportionnel à l'intensité du courant électrique qui lui a donné naissance.

1.2.d) Ordres de grandeur

Capacité exigible : Citer des ordres de grandeur de champs magnétiques : au voisinage d'aimants, dans un appareil d'IRM, dans le cas du champ magnétique terrestre.

♥ À retenir : 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.

Source du champ	Terre	Aimant usuel	Appareil IRM
Quelques ordres de grandeur :	$4,7 \cdot 10^{-5} \text{ T}$	0,1 T à 1 T	3 T

1.3 Cartes de champ magnétique

📖 Définition : Ligne et carte de champ

- Une **ligne de champ magnétique** est une courbe orientée tangente en tout point au champ magnétique.
- La visualisation globale du champ vectoriel, sur laquelle sont tracées plusieurs lignes de champ, est alors appelée **carte de champ**.

♥ À retenir : Propriétés des lignes de champ magnétique

- Les lignes de champ magnétique sont toujours fermées, elles font des boucles (sauf si elles partent à l'infini).
 - 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.

Capacité exigible : Tracer l'allure des cartes de champs magnétiques pour un aimant droit, une spire circulaire et une bobine longue.

♥ À retenir : Cartes de champ magnétique

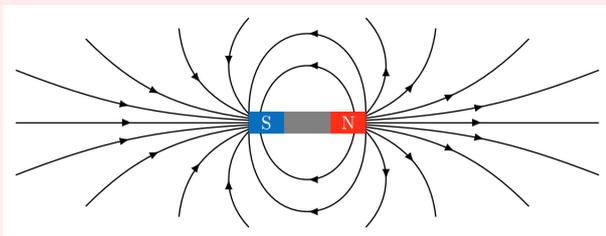


FIGURE 2 – Aimant droit

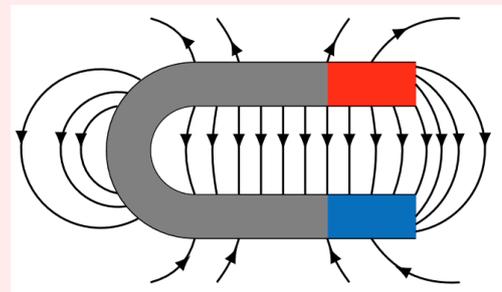


FIGURE 3 – Aimant en U

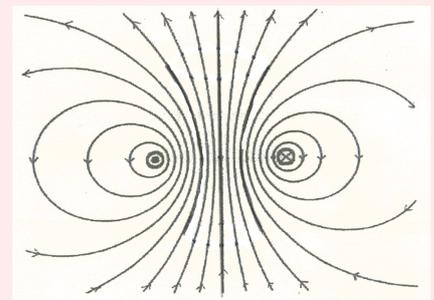
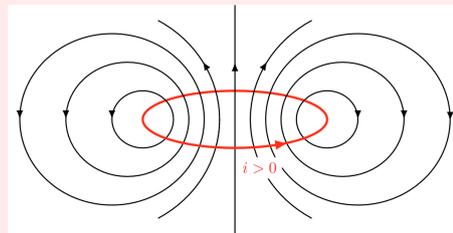
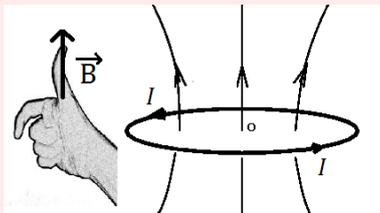


FIGURE 4 – Carte de champ magnétique d'une spire circulaire

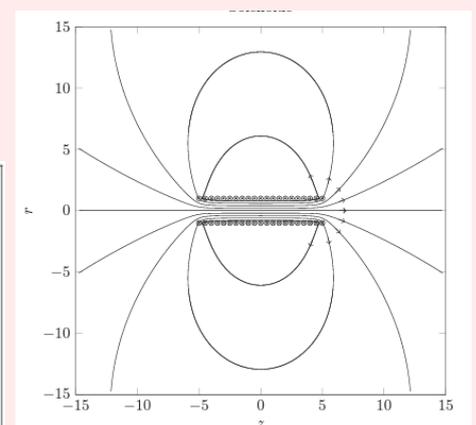
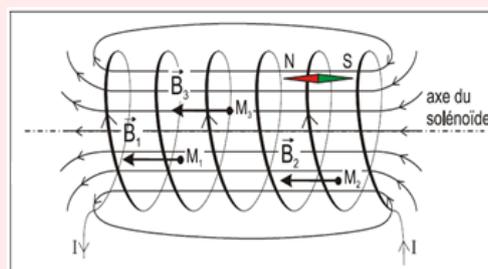
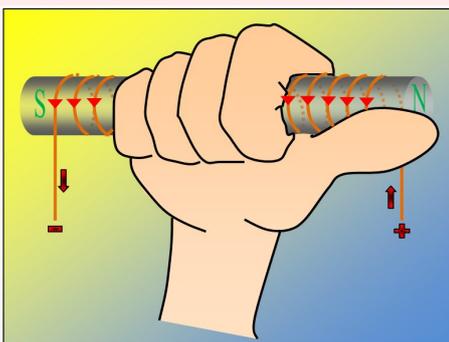


FIGURE 5 – Carte de champ magnétique d'une bobine longue

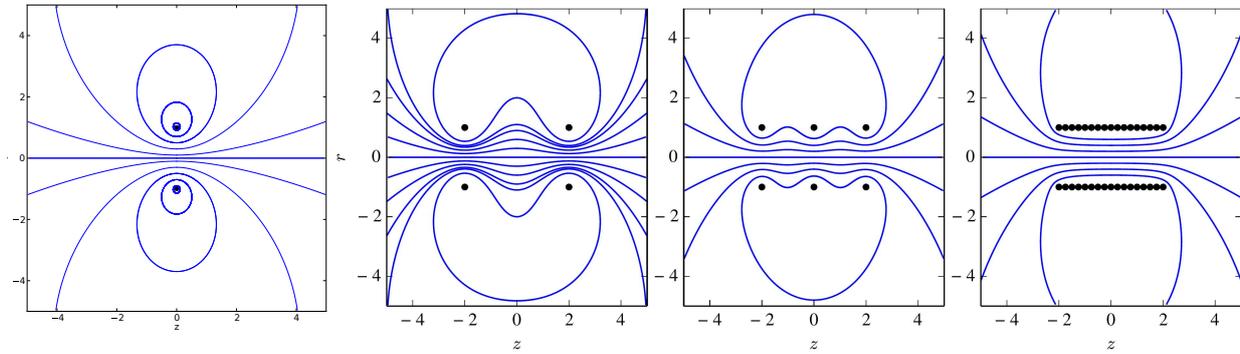


FIGURE 6 – Lignes de champ avec une, deux, trois, puis un grand nombre de spires

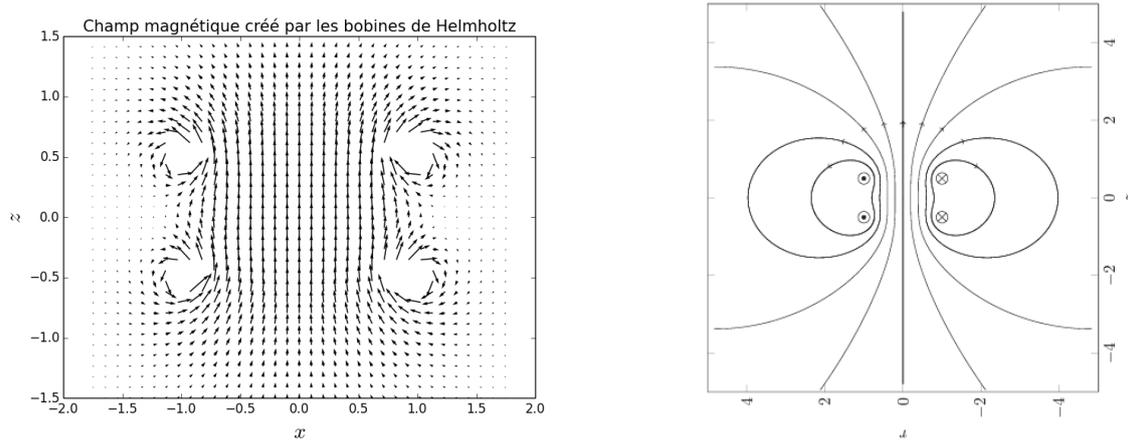


FIGURE 7 – Carte de champ magnétique des bobines de Helmholtz : 2 bobines plates identiques, parcourues par des courants I identiques, l'une à côté de l'autre en configuration de Helmholtz c'est-à-dire que la distance d les séparant est égale au rayon R de chacune des bobines.

💡 Méthode : Analyse d'une carte de champ

- 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.

Capacité exigible : Décrire un dispositif permettant de réaliser un champ magnétique quasi uniforme.

♥ À retenir : Production d'un champ magnétique uniforme

Les dispositifs suivants permettent de produire un champ magnétique uniforme :

- aimant en U : dans son entrefer (dans le U) ;
- bobine longue (de longueur grande devant son rayon) : à l'intérieur, loin des bords ;
- bobines de Helmholtz : entre deux bobines plates identiques parcourues par des courants identiques dans le même sens et séparées d'une distance égale au rayon.

II Symétries du champ magnétique

♥ À retenir : Principe de Curie

Un phénomène physique présente au minimum les éventuelles symétries de sa cause.

Ici le phénomène physique étudié est le champ magnétique, dont la cause est le courant électrique. Le champ magnétique présente donc au minimum les symétries du courant électrique.

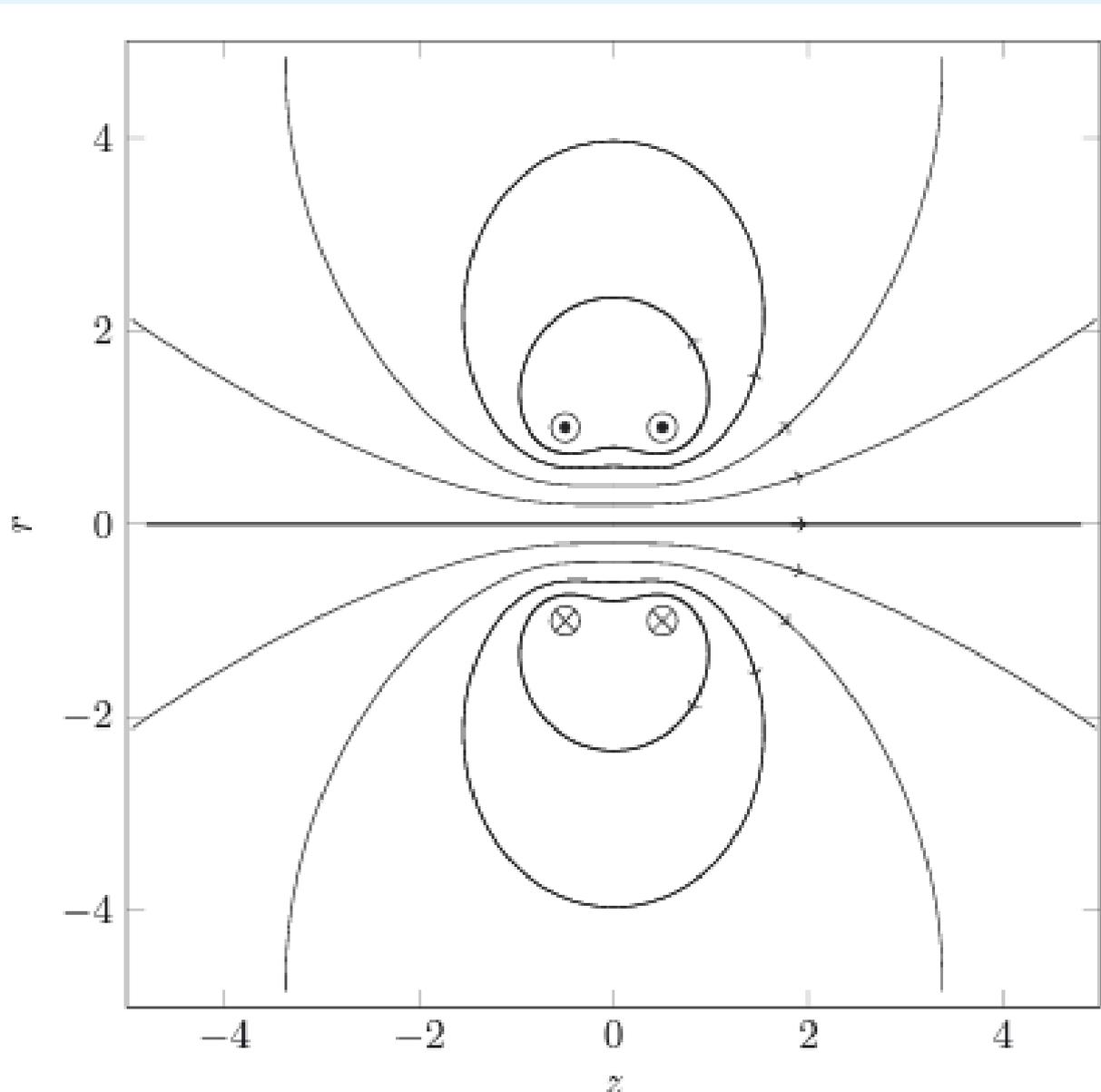
II.1 Symétries d'une distribution de courant

📖 Définitions : Plan de symétrie et d'antisymétrie d'une distribution de courant

- Une distribution de courant admet un plan de symétrie Π_S , si la distribution de courant obtenue par symétrie par rapport au plan Π_S lui est identique.
- Une distribution de courant admet un plan d'antisymétrie Π_A , si la distribution de courant obtenue par symétrie par rapport au plan Π_A lui est en tout point opposée (direction identique, sens opposé, valeur égale).

🍃 Activité n°1 – Symétries d'une distribution de courant

Déterminer les plans de symétrie et d'antisymétrie de la distribution de courant.



II.2 Conséquences des symétries sur \vec{B}

Activité n°2 – Conséquences des symétries sur \vec{B}

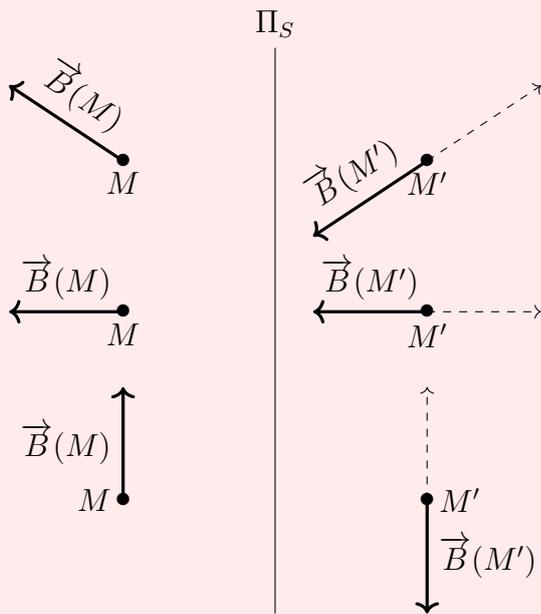
On reprend la situation précédente.

- Q1. Choisissez deux points M et M' symétriques par rapport à un plan d'antisymétrie de la distribution de courant. Représenter les champs magnétiques $\vec{B}(M)$ et $\vec{B}(M')$ en M et M' . Que pouvez-vous en dire ?
- Q2. Comment est le champ magnétique **en un point** M du plan d'antisymétrie ?
- Q3. Choisissez deux points M et M' symétriques par rapport à un plan de symétrie de la boucle de courant. Représenter les champs magnétiques $\vec{B}(M)$ et $\vec{B}(M')$ en M et M' . Que pouvez-vous en dire ?
- Q4. Comment est le champ magnétique **en un point** M du plan de symétrie ?

À retenir : Conséquences des symétries sur le champ magnétique

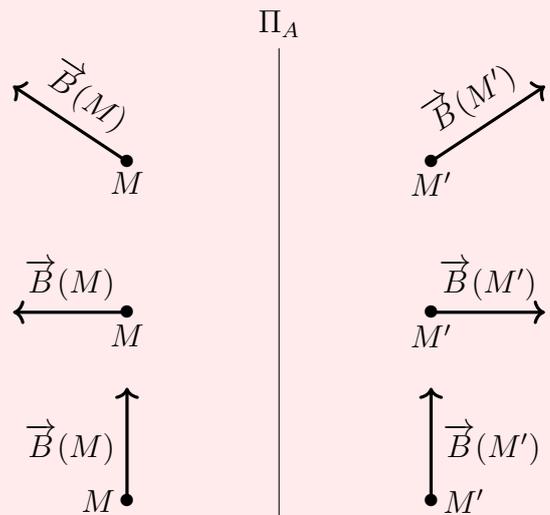
■ Le champ magnétique $\vec{B}(M')$ en un point M' symétrique du point M **par rapport à un plan de symétrie** de la distribution de courant est égal à l'opposé du symétrique du champ magnétique en M .

$$\vec{B}(M') = -\text{sym}_{\Pi_S}(\vec{B}(M))$$



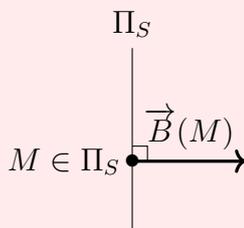
■ Le champ magnétique $\vec{B}(M')$ en un point M' symétrique du point M **par rapport à un plan d'antisymétrie** de la distribution de courant est égal au symétrique du champ magnétique en M .

$$\vec{B}(M') = \text{sym}_{\Pi_A}(\vec{B}(M))$$

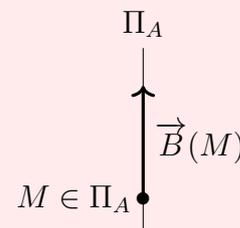


À retenir : Conséquences en un point d'un plan de symétrie/d'antisymétrie

En un point d'un plan de symétrie de la distribution de courant, le champ magnétique est orthogonal au plan de symétrie.



En un point d'un plan d'antisymétrie de la distribution de courant, le champ magnétique appartient au plan d'antisymétrie.



II.3 Invariances d'une distribution de courant et conséquences



Définitions : Invariances d'une distribution de courant

- Une distribution de courant est invariante par toute translation d'axe (Ox) ssi, vue des points $P_1(x_1, y, z)$ et $P_2(x_2, y, z)$, quelques soient x_1 et x_2 , la distribution de courant est la même.
- Une distribution de courant est invariante par toute rotation d'angle θ d'axe (Oz) ssi, vue des points $P_1(r, \theta_1, z)$ et $P_2(r, \theta_2, z)$, quelques soient les angles θ_1 et θ_2 , la distribution de courant est la même.



À retenir : Conséquences des invariances sur le champ magnétique

- Si la distribution de courant est invariante par toute translation d'axe (Ox) , alors les composantes du champ magnétique ne dépendent pas de x .
- Si la distribution de courant est invariante par toute rotation d'angle θ d'axe (Oz) , alors les composantes du champ magnétique ne dépendent pas de θ .

II.4 Comment déterminer la forme générale du champ magnétique ?

💡 Méthode : Comment déterminer la forme générale d'un champ magnétique ?

1. Choisir le système de coordonnées adapté.
2. Écrire la forme générale (dans le système de coordonnées adapté) :

$$\vec{B}(M) = B_x(x, y, z)\vec{u}_x + B_y(x, y, z)\vec{u}_y + B_z(x, y, z)\vec{u}_z$$

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

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

3. Étudier les plans de symétrie et d'antisymétrie, pour supprimer des composantes.
 - a) Choisir un point M quelconque de l'espace.
 - b) Déterminer un premier plan de symétrie/d'antisymétrie de la distribution de courant et **ÉCRIRE OBLIGATOIREMENT** la phrase ci-dessous :

« Le plan (.....,,) est un plan (antisymétrique/symétrie) de la distribution de courant, donc le champ magnétique (appartient/est perpendiculaire) à ce plan, donc la/les composante/s du champ magnétique selon (et) est/sont nulle/s. »

- c) Barrer la/les composantes nulles.
- d) Refaire les deux étapes précédentes, autant de fois qu'il y a de plans de symétrie/d'antisymétrie.
- e) Conclure : « Le champ magnétique est porté par le vecteur unitaire »

$$\vec{B}(M) = B_{\dots}(r, y, z)\vec{u}_{\dots}$$

$$\vec{B}(M) = B_{\dots}(r, \theta, z)\vec{u}_{\dots}$$

$$\vec{B}(M) = B_{\dots}(r, \theta, \varphi)\vec{u}_{\dots}$$

4. Étudier les invariances, pour déterminer les variables d'espace dont ne dépendent pas les composantes. **ÉCRIRE OBLIGATOIREMENT** la(les) phrase(s) ci-dessous :
 - a) « La distribution de courant est invariante par toute translation selon , par conséquent la composante du champ magnétique ne dépend pas de la variable (x, y, z) »
Barrer dans $B_{\dots}(\dots, \dots, \dots)$ la variable dont B_{\dots} ne dépend pas.
 - b) « La distribution de courant est invariante par toute rotation autour de l'axe , par conséquent la composante du champ magnétique ne dépend pas de la variable (θ, φ) »
Barrer dans $B_{\dots}(\dots, \dots, \dots)$ la variable dont B_{\dots} ne dépend pas.
 - c) Conclure : « La composante du champ magnétique ne dépend que de »
5. Conclure :

$$\vec{B}(M) = B_{\dots}(\dots)\vec{u}_{\dots}$$

Exercice à maîtriser n°3 – Fil infini

On étudie le champ magnétique créé par un fil infini parcouru par un courant I permanent. On utilise les coordonnées cylindriques d'axe celui du fil.

Le champ magnétique présente, a priori, trois composantes qui dépendent des trois coordonnées cylindriques :

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

Le but de l'étude des symétries est de **déterminer les composantes qui sont nulles**.

Q1. Faire deux schémas : un dans le plan du fil, et un dans le plan perpendiculaire au plan du fil. Placer sur les deux schémas les vecteurs unitaires de la base cylindrique associés à un point $M(r, \theta, z)$.

Q2. Déterminer un plan de symétrie et un plan d'antisymétrie de la distribution de courant passant par le point M .

En déduire les conséquences sur le champ magnétique. Quel vecteur unitaire porte le champ magnétique ?

Q3. En déduire l'allure des lignes de champ magnétique créé par le fil infini

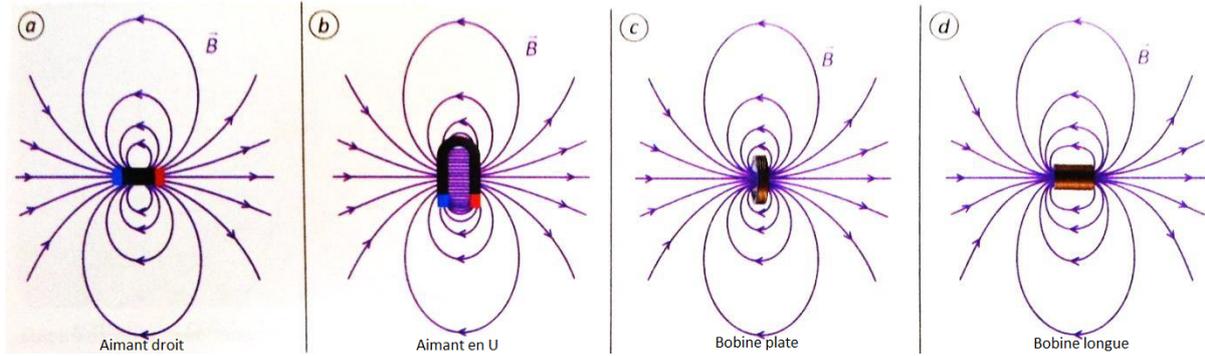
Le but de l'étude des invariances est de **déterminer les variables d'espace dont ne dépendent pas les composantes du champ magnétique**.

Q4. Déterminer les invariances de la distribution de courant.

En déduire les conséquences sur les composantes du champ magnétique.

Q5. En déduire la forme du champ magnétique créé par un fil infini.

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 de la source, ces dispositifs sont des **dipôles magnétiques**. En fait, tous ces dispositifs sont équivalents à grande distance à un dispositif de base : une spire circulaire. Afin de comparer ces dispositifs, on introduit leur moment magnétique \vec{M} .

Nous allons définir le moment magnétique \vec{M} dans le cas d'une boucle de courant plane. Pour cela, nous devons déjà définir ce que nous appellerons le « vecteur surface » associé à une boucle de courant plane.

III.1 Vecteur surface

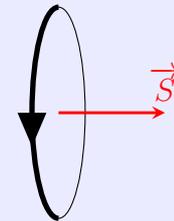
Définition : Vecteur surface

Soit une boucle de courant plane. On **commence par orienter la boucle plane** : « On met une flèche sur le contour ». On définit le **vecteur surface** \vec{S} de la surface plane s'appuyant sur la boucle de courant plane orientée :

- direction : orthogonale au plan défini par la boucle plane.
- sens : donné par la **règle de la main droite**.

La main droite enlace la boucle de courant avec la flèche allant de la base des doigts autres que le pouce vers le bout des doigts, le pouce indique alors le sens de \vec{S} .

- norme : la surface S .



III.2 Moment magnétique d'une boucle plane

Capacité exigible : Définir le moment magnétique associé à une boucle de courant plane.

Définition : Moment magnétique

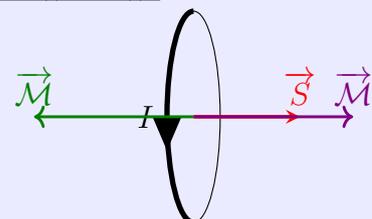
Le **moment magnétique** d'une boucle de courant plane, orientée, de surface S , parcourue par un courant d'intensité I , est le vecteur

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

Caractéristiques du vecteur moment magnétique 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} ;
 - Si $I < 0$: \vec{M} est du sens opposé à \vec{S} .

- norme : $\|\vec{M}\| = |I| \times S$ en $A \cdot m^2$



♥ À retenir : Moment magnétique d'un circuit de N spires

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

$$\vec{\mathcal{M}} = NI \vec{S}$$

avec \vec{S} le vecteur surface d'une des spires planes coaxiales.

III.3 Moment magnétique d'un aimant permanent

Capacité exigible : Associer à un aimant un moment magnétique, par analogie avec une boucle de courant. Citer un ordre de grandeur du moment magnétique associé à un aimant usuel.

- Les lignes de champ d'un aimant sont identiques à grande distance aux lignes de champ d'une boucle de courant plane. On étend donc la notion de moment magnétique aux aimants. MAIS il ne s'écrit pas en fonction d'une surface et d'un courant, car **aucun courant électrique ne circule dans un aimant**.

Le moment magnétique $\vec{\mathcal{M}}$ d'un aimant part du pôle sud et va au pôle nord de l'aimant.

Pour un aimant Néodyme-Fer-Bore ($\text{Ne}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$), la norme de son moment magnétique est généralement comprise entre $0,1 \text{ A} \cdot \text{m}^2$ et $10 \text{ A} \cdot \text{m}^2$.

- 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 $m_{\text{Terre}} \approx 8 \cdot 10^{22} \text{ A} \cdot \text{m}^2$, dont l'axe est actuellement incliné d'une dizaine de degrés par rapport à l'axe de rotation de la planète sur elle-même.

♥ À retenir : Moment magnétique d'un aimant permanent

Toute source de champ magnétique (aimant, circuit parcouru par un courant) est caractérisée par son moment magnétique : celui-ci permet de déterminer le champ créé à grande distance mais aussi l'action subie par le dipôle (aimant, circuit parcouru par un courant) placé dans un autre champ (cf chapitres suivants).

Pour un circuit parcouru par un courant électrique, $\|\vec{\mathcal{M}}\|$ dépend de l'intensité I du courant et de la surface du circuit.

Pour un aimant, $\|\vec{\mathcal{M}}\|$ dépend du matériau et de son volume.

Ordres de grandeur à connaître :

Dipôle magnétique	Moment magnétique en $\text{A} \cdot \text{m}^2$
Aimant usuel	$1 \text{ A} \cdot \text{m}^2$
Terre	$7,9 \cdot 10^{22} \text{ A} \cdot \text{m}^2$