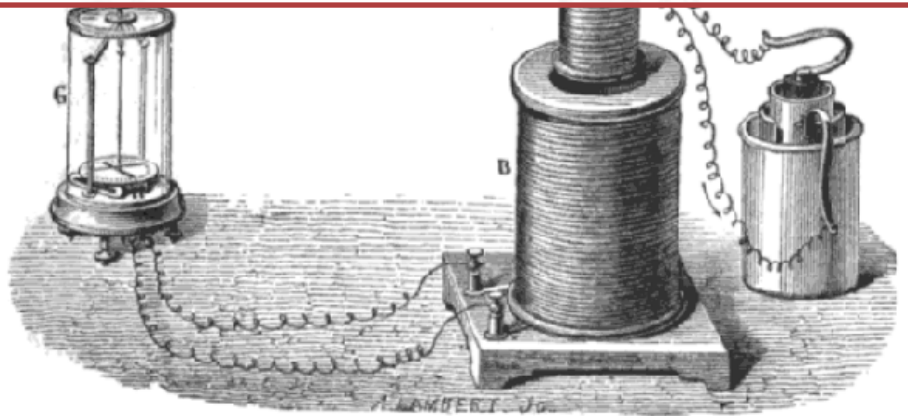
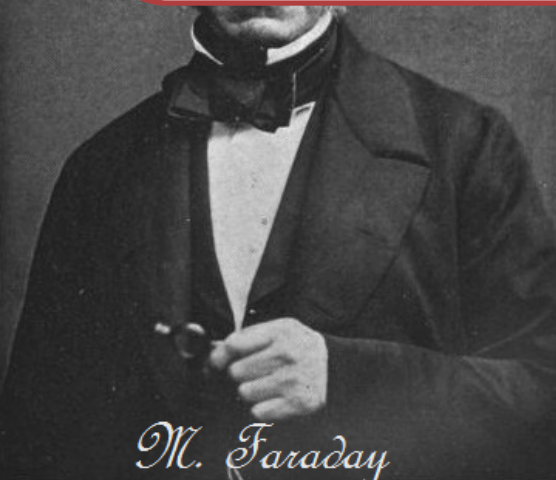


# Chapitre 1 : Champs magnétiques



## LE COURS

### A Qu'est-ce que le magnétisme ?

|     |                                          |   |
|-----|------------------------------------------|---|
| A.1 | Différents types de magnétisme .....     | 2 |
| A.2 | Les aimants .....                        | 3 |
| A.3 | Magnétisme et courants électriques ..... | 4 |

### B Définition et propriétés d'un champ magnétique

|     |                                        |   |
|-----|----------------------------------------|---|
| B.1 | Définition d'un champ magnétique ..... | 5 |
| B.2 | Propriétés générales .....             | 7 |
| B.3 | Des cartes de champ à connaître .....  | 8 |

### C Champ magnétique et courant électrique

|     |                                                                         |    |
|-----|-------------------------------------------------------------------------|----|
| C.1 | Intensité du champ magnétique .....                                     | 9  |
| C.2 | Orientation des lignes de champ .....                                   | 9  |
| C.3 | Influence des invariances spatiales de la distribution de courant ..... | 10 |
| C.4 | Propriétés de symétrie et d'antisymétrie .....                          | 11 |

### D Moment magnétique

|     |                                                    |    |
|-----|----------------------------------------------------|----|
| D.1 | Définition .....                                   | 12 |
| D.2 | Expression du moment magnétique d'un circuit ..... | 13 |

# A Qu'est-ce que le magnétisme?

## A.1 Différents types de magnétisme

### ► Découverte du magnétisme dans l'antiquité : la magnétite

La « magnétite », ou « pierre d'aimant » (essentiellement de l'oxyde de fer  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) a la propriété d'attirer de petits morceaux de fer par exemple. Un morceau de fer frotté contre un aimant possède à son tour de légères propriétés attractives sur d'autres morceaux de fer : le morceau de fer a été « magnétisé » ou « aimanté ». Ce genre d'interaction a priori nouvelle se distinguait bien de l'interaction électrostatique ou gravitationnelle connues à l'époque. On parla alors de **magnétisme**.



### ► Sensibilité de la matière au magnétisme

Nous savons aujourd'hui que les matériaux qui nous entourent peuvent être classés en quatre catégories, suivant leurs sensibilités respectives aux effets magnétiques.

**Les ferromagnétiques durs** Ce sont les matériaux constitutifs des aimants qui créent en permanence des effets magnétiques importants dans leur voisinage. Il s'agit d'alliages, rares à l'état naturel, à l'exception de la magnétite évoquée précédemment.

Aimant NEODYME 110kg

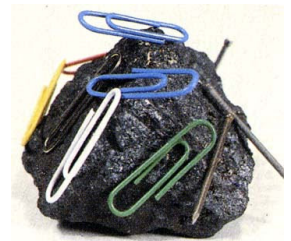
**FORCE** Kg  
**110KG**  
**D'ADHÉRENCE**  
Diamètre: 48mm  
Hauteur: 54mm  
Poids: 0.21kg



#### Exemple

Alliages fréquents : aluminium-nickel-cobalt (« alnico »), néodyme-fer-bore (NdFeB), ...

**Les ferromagnétiques doux** Il s'agit de « matériaux aimantables » qui ne créent pas à eux seuls d'effets magnétiques significatifs, mais qui sont fortement attirés par les aimants. Ils peuvent s'aimanter temporairement : après avoir été en contact avec un aimant puis isolé, ils peuvent se comporter comme des aimants de faible magnétisme.



#### Exemples

Fer, cobalt, nickel, quelques alliages, ...

**Les paramagnétiques et les diamagnétiques** Ces matériaux semblent insensibles à la présence d'un aimant. En réalité, les effets magnétiques sont d'intensité environ  $10^6$  fois plus faibles que pour le fer, et sont donc difficilement observables mais néanmoins détectables avec les instruments de mesure actuels. Il s'agit de l'essentiel des matériaux qui nous entourent.

On distingue :

- les matériaux **paramagnétiques**, qui subissent une très faible attraction de la part d'un aimant,
- et les **diamagnétiques** dont l'interaction avec un aimant est très légèrement répulsive (*ci-contre du graphite lévitant au-dessus d'aimants*).



Cette différence de comportement est la conséquence de fortes différences au niveau microscopique entre ces deux types de matériau.

#### Exemples

L'aluminium, le dioxygène, le platine, le magnésium, le tungstène, l'uranium, ... sont paramagnétiques.  
L'eau, le cuivre, l'argent, l'or, le plomb, le graphite, ... sont diamagnétiques.

## A.2 Les aimants

### a. Pôles magnétiques

Un aimant possède toujours deux pôles au voisinage desquels les effets magnétiques sont particulièrement intenses. Ces pôles sont indissociables : si on casse un aimant en deux, on obtient deux nouveaux aimants avec leurs deux pôles respectifs.

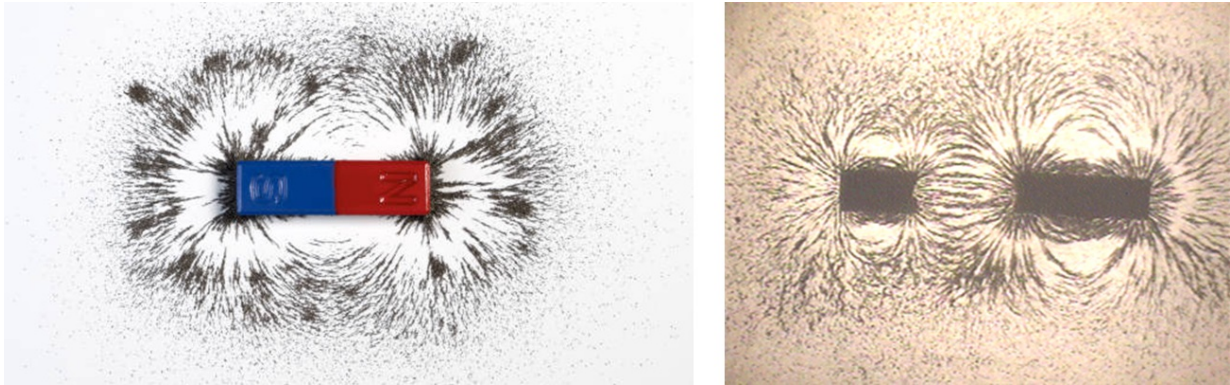


Figure 1 – À droite : un aimant cassé en deux, entouré de limaille de fer. On distingue nettement les nouveaux pôles de l'aimant.

Les deux pôles d'un aimant ne jouent pas le même rôle. En effet, si nous disposons une petite aiguille aimantée libre de pivoter sur un axe, celle-ci adopte toujours une direction privilégiée. C'est le principe de la boussole : un des pôles de l'aimant semble toujours pointer vers le nord géographique. Inversement, l'autre pôle indique toujours le pôle sud géographique.

On distingue donc plus précisément les deux pôles magnétiques d'un aimant :

- ❑ le **pôle nord magnétique** de l'aimant tend à s'orienter vers le pôle nord géographique (c'est le cas de la pointe de l'aiguille aimantée d'une boussole) ;
- ❑ le **pôle sud magnétique** tend à s'orienter vers le pôle sud géographique.

On peut aussi mettre en évidence que l'interaction entre deux aimants est attractive si on met face à face le pôle sud d'un aimant et le pôle nord de l'autre. Elle devient répulsive si on met face à face leurs pôles sud (ou nord) respectifs.

Les pôles magnétiques de même nature se repoussent et ceux de natures différentes s'attirent.

Interprétons alors le principe de la boussole. La Terre se comporte comme un aimant dont le pôle sud magnétique, correspondant au pôle nord géographique, attire le pôle nord de l'aiguille aimantée de la boussole. Ainsi, grâce à la boussole, on ne perd pas le nord ...

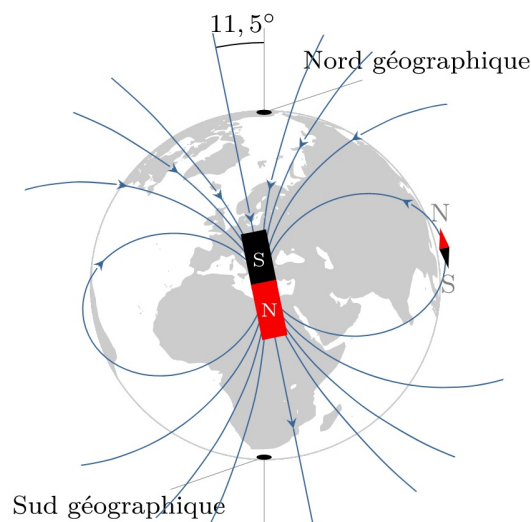


Figure 2 – La Terre agit comme un aimant sur une aiguille aimantée.

## b. « Spectre magnétique »

En disposant au voisinage d'un aimant de la limaille de fer ou bien des aiguilles légèrement aimantées (des boussoles autrement dit) libres de pivoter, on constate l'apparition de lignes particulières qui caractérisent le champ magnétique de l'aimant.

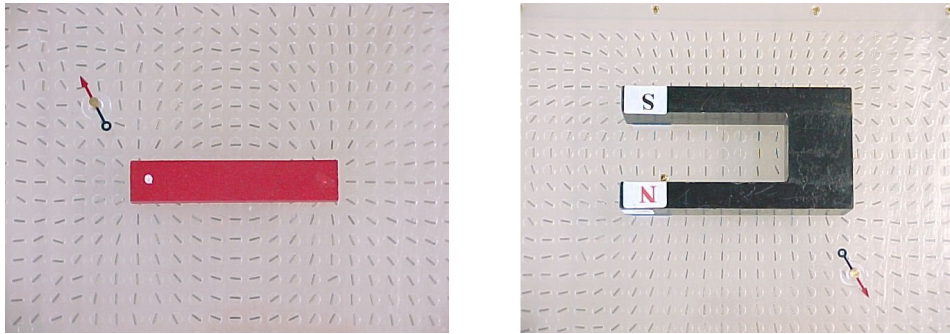


Figure 3 – Spectre magnétique d'un aimant droit et d'un aimant en U

Cette figure particulière spécifique de l'aimant étudié était autrefois appelée « **spectre magnétique** » .

(R) Plus tard, nous parlerons plutôt de carte de champ et de lignes de champ sur lesquelles s'alignent les aiguilles aimantées...

## A.3 Magnétisme et courants électriques

En 1820, le danois Oersted observe la déviation d'une aiguille aimantée au voisinage du fil conducteur parcouru par un courant.

La déviation est d'autant plus forte que le courant est fort, et elle s'effectue dans l'autre sens si on inverse le sens du courant.

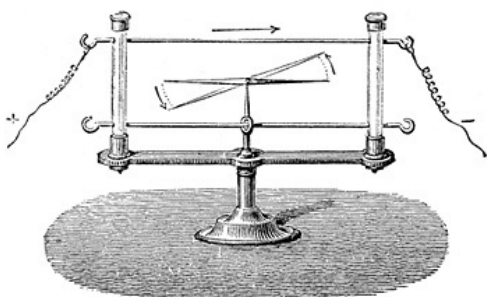


Fig. 60. — Expérience d'Oersted.

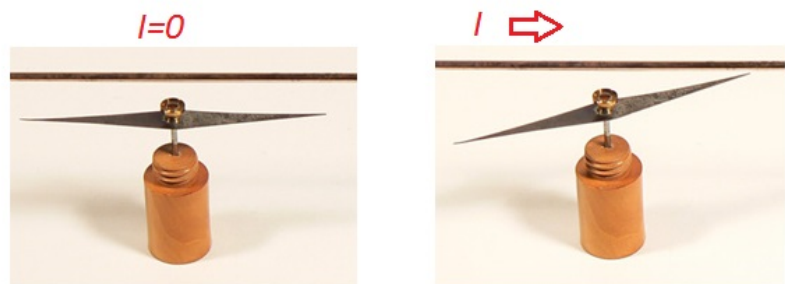


Figure 4 – Expérience d'Oersted

D'une manière générale, un courant électrique produit des effets magnétiques.

Les effets magnétiques observés dépendent du sens du courant et sont **d'autant plus intenses que l'intensité du courant est forte**.

Dans la foulée, le français Ampère réalise un enroulement hélicoïdal de fil qu'il baptise « solénoïde » et dont il montre le comportement très similaire à celui d'un aimant droit, dans l'allure du spectre magnétique obtenu notamment.

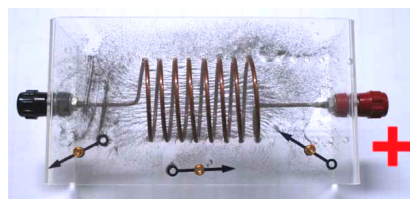


Figure 5 – Spectre magnétique d'un enchaînement de spires

De plus, la nature des pôles peut être inversée en inversant simplement le sens du courant.

## ► Origine du magnétisme

Si les mouvements de charges génèrent du magnétisme d'après l'expérience d'Oersted, comment interpréter le magnétisme des matériaux ferromagnétiques ? Notamment, où « se cache » le déplacement de charges dans la matière ?

En utilisant la physique «classique» (càd, celle de Newton), on pourrait modéliser l'atome comme un cortège d'électrons en orbite autour du noyau. D'où une modélisation des atomes tels des boucles de courant agissant comme des aimants microscopiques qui contribueraient ensemble à générer un magnétisme observable à plus grande échelle (échelle *macroscopique*).

Quelle qu'en soit la forme, le magnétisme est la conséquence de l'existence de charges mobiles.

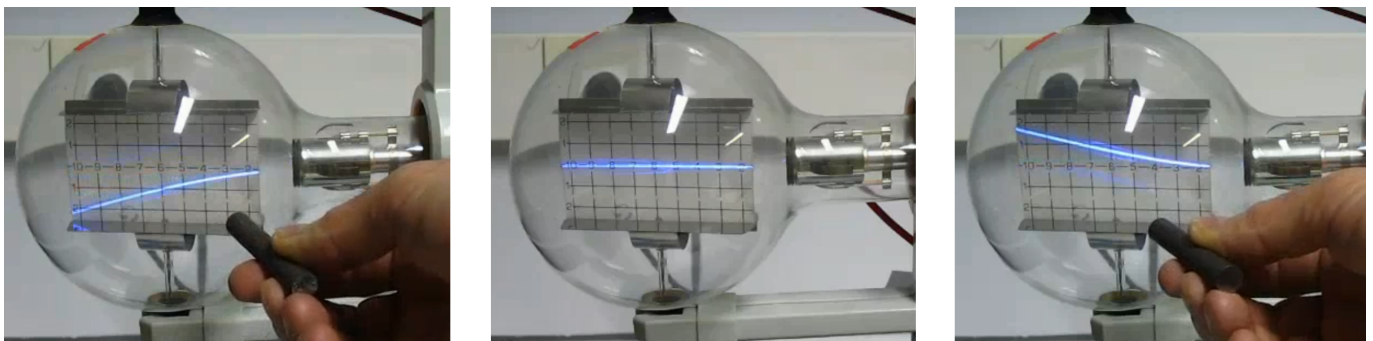
**(R)** *En réalité, la mécanique classique de Newton est incapable de décrire correctement le comportement de la matière à l'échelle microscopique. Notamment, cette vision «planétaire» de l'atome est a priori incorrecte du point de vue de la mécanique quantique, plus apte à décrire la réalité à cette échelle. Mais toutefois, la mécanique quantique est elle-même plutôt en accord avec cette interprétation : ainsi, chaque électron constitue bel et bien une source de magnétisme et dans le cas où les effets magnétiques ne se compensent pas, il n'est pas faux de considérer un atome comme un «aimant microscopique».*

## B Définition et propriétés d'un champ magnétique

### B.1 Définition d'un champ magnétique

#### a. Observation des effets magnétiques sur la trajectoire de particules chargées

C'est à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle que l'on parvient, avec le britannique Crookes, à produire des faisceaux électroniques. On peut observer la trajectoire du faisceau à l'aide d'un écran fluorescent disposé en biais.



**Figure 6** – Trajectoire d'un faisceau d'électrons avec et sans champ magnétique dans un tube de Crookes. À gauche, le pôle sud de l'aimant est présenté vers le faisceau d'électron ; alors qu'à droite, il s'agit du pôle nord. Au centre, l'aimant est suffisamment loin pour ne pas influencer le mouvement des électrons.

Sous l'effet d'un aimant ou d'un solénoïde parcouru par un courant, le faisceau peut subir une déflexion magnétique. On peut interpréter cette déflexion comme l'effet d'une force ressentie par l'électron d'autant plus forte que sa vitesse est grande et que l'aimant utilisé est « fort » (ou que le courant du solénoïde ayant produit le champ magnétique est élevé).

Cela nous amène forcément à associer une grandeur propre à l'aimant qui permettra de quantifier l'interaction entre l'aimant et la particule chargée. On modélise donc les effets magnétiques de l'aimant par l'effet de cette grandeur que l'on appellera **champ magnétique** et qu'il nous reste encore à définir à la lumière des constatations expérimentales.

## b. Définition d'un champ magnétique

### ► Vecteur champ magnétique

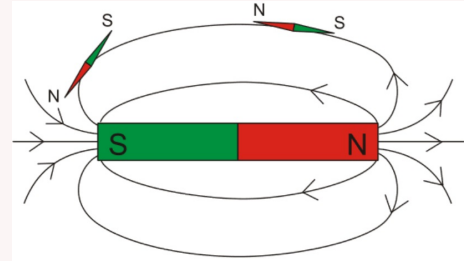
D'après l'observation du spectre magnétique autour d'un aimant ou d'une source de courant, et d'après l'expérience de déflexion d'un faisceau d'électrons, il apparaît naturel d'attribuer à la source du magnétisme une grandeur **vectorielle**. La manière la plus simple et instinctive de définir ce vecteur est de l'associer à l'orientation de l'aiguille aimantée à proximité.

#### Définition

Le **vecteur champ magnétique**  $\vec{B}(M)$  d'une source magnétique est une grandeur vectorielle dont la direction et le sens sont indiqués par une aiguille aimantée : **le vecteur  $\vec{B}(M)$  au point  $M$  où est placée l'aiguille aimantée est dirigée du pôle sud vers le pôle nord de l'aiguille.**

On considèrera que cette grandeur est telle que plus sa norme est grande, plus les effets magnétiques observés sont intenses.

Les **lignes d'un champ magnétique**  $\vec{B}(M)$  sont les courbes orientées qui sont en tout point  $M$  tangentes au vecteur  $\vec{B}(M)$ . L'ensemble des lignes de champ forme ainsi la **carte de champ** de  $\vec{B}(M)$ .



**(R)** Si les effets magnétiques ne sont pas constants dans le temps, alors il faudra tenir compte de la dépendance temporelle du champ magnétique :  $\vec{B}(M, t)$ . Par contre, si il n'y a pas de dépendance temporelle, on parlera de **champ magnétostatique**.

### ► Force magnétique de Lorentz et champ magnétique

Revenons maintenant à l'expérience du tube de Crookes (**Figure 6**). L'observation de la déviation du faisceau électronique va permettre de modéliser l'action subie par un électron par un vecteur force.

D'après les constatations expérimentales, il faut que ce vecteur force soit d'intensité d'autant plus importante que :

- la vitesse de la particule est grande ;
- sa charge est grande ;
- le champ magnétique est « intense ».

Ces informations expérimentales nous renseignent sur la norme du vecteur force.

Pour déterminer l'orientation du vecteur force, il faut tenir compte de l'influence que peuvent avoir le signe de la charge, l'orientation connue des lignes de champs (grâce au spectre magnétique) le sens du vecteur vitesse sur le sens de la force. On en vient ainsi à modéliser correctement l'action subie par l'électron par le vecteur force :

$$\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

qui est la **force magnétique de Lorentz**.

La force magnétique de Lorentz donne donc une définition du champ magnétique en terme de force, en accord avec les phénomènes observés.

On en déduit alors la dimension du champ magnétique :  $[B] = \frac{[F]}{[q][v]}$

Or  $[F] = M.L.T^{-2}$  d'après la deuxième loi de Newton,

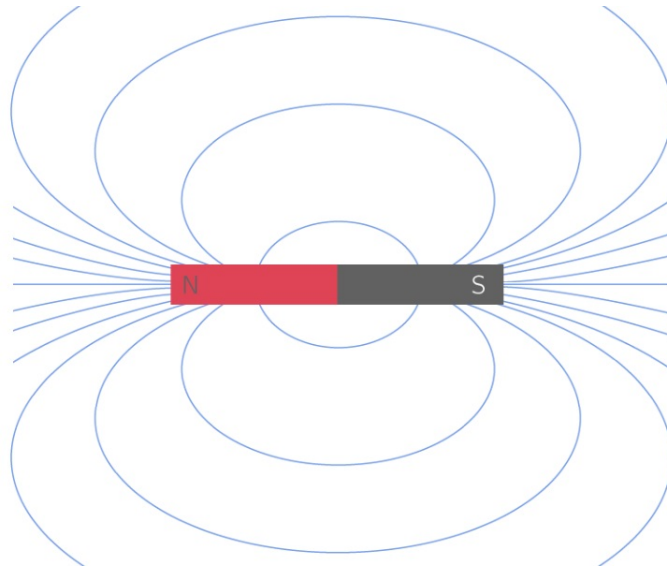
$[v] = L.T^{-1}$ , par définition d'une vitesse,

et  $[q] = I.T$  (où  $I$  est la dimension d'une intensité électrique) en servant de la définition d'une intensité  $i = \frac{\delta Q}{dt}$ .

D'où :  $[B] = M.T^{-2}.I^{-1}$ .

Dans le système international des unités, on exprimera donc l'intensité d'un champ magnétique en  $\text{kg.s}^{-2}.\text{A}^{-1}$  qu'on nomme usuellement **Tesla** :  $1 \text{ T} = 1 \text{ kg.s}^{-2}.\text{A}^{-1}$ .

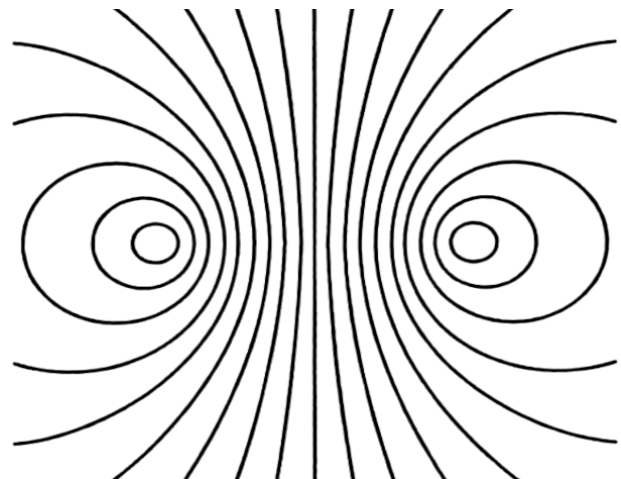
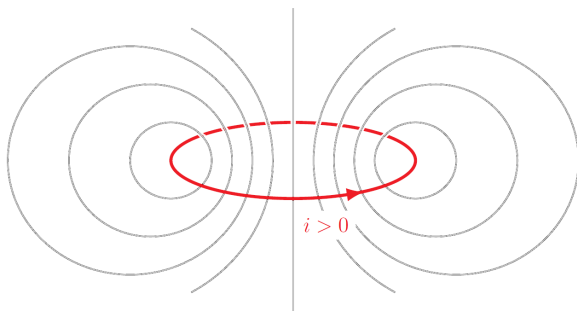


**B.3** Des cartes de champ à connaître**a.** Aimant droit

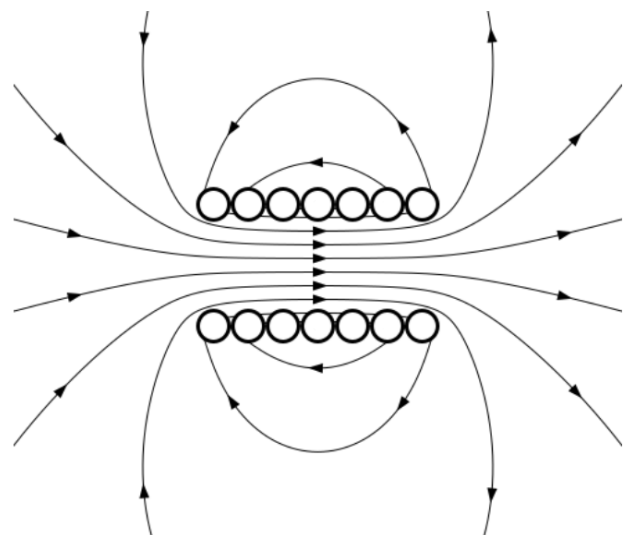
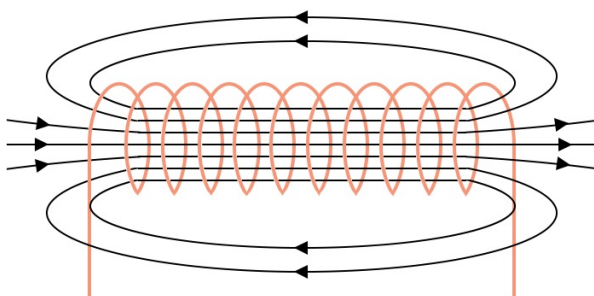
4

**b.** Spire circulaire

Une spire est une boucle dans laquelle circule un courant électrique. Ci-dessous la spire est de forme circulaire. La carte de champ observée est la même dans chaque plan orthogonal au plan de la spire et contenant l'axe de la spire (plan de la feuille par exemple).



5

**c.** Solénoïde

6

# C Champ magnétique et courant électrique

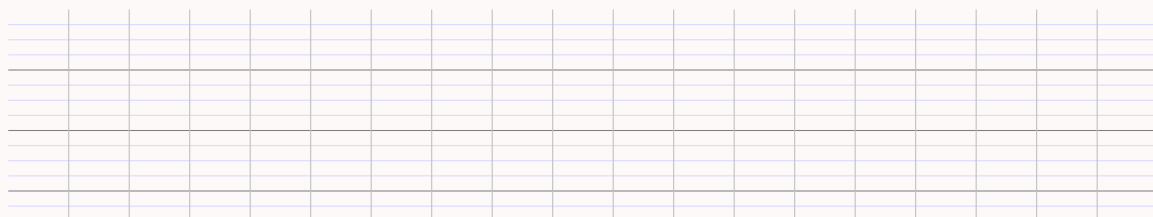
## C.1 Intensité du champ magnétique

Dans le vide et dans l'air, l'intensité du champ magnétique  $B$  est proportionnelle à l'intensité  $i$  du courant électrique qui en est la source.

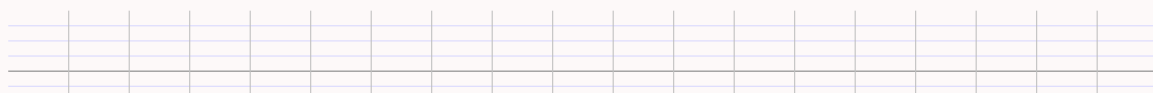
### Application n°2

On donne la *perméabilité magnétique du vide* :  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$ .

- À une distance  $r$  d'un fil rectiligne infini parcouru par un courant d'intensité électrique  $i > 0$ , on peut montrer que le champ magnétique vaut en norme  $B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r}$ .
  - En TP,  $i$  peut être de l'ordre de 100 mA. Quelle est l'intensité du champ magnétique à 10 cm d'un fil électrique employé dans le montage ?
  - Quel serait le champ magnétique produit au pied d'un pylône électrique de 15 m soutenant une ligne électrique parcouru par un courant de 1,0 kA ?
  - Pour mieux se représenter ces valeurs, à quel ordre de grandeur pourrait-on les comparer ?



- Au sein d'un solénoïde (exemple **B.3 (c)**), la norme du champ magnétique vaut  $B = \frac{\mu_0 N i}{\ell}$ ,  $N$  étant le nombre de spires et  $\ell$  la longueur du solénoïde. Effectuer l'application numérique dans le cas où  $N = 1000$ ,  $\ell = 10 \text{ cm}$  et  $i = 100 \text{ mA}$ .



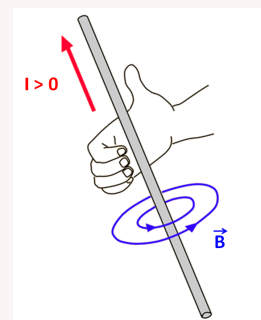
7

## C.2 Orientation des lignes de champ

Les lignes de champ magnétiques enlacent les fils parcourus par les courants électriques.

L'orientation des lignes du champ et le sens du courant sont reliés par la **règle de la main droite** : en orientant le pouce de la main droite suivant le sens du **courant**, les lignes de champ magnétiques produites s'orientent suivant les autres doigts de la main droite.

**(R) ATTENTION** : ne pas confondre «sens du courant» et «sens algébrique de l'intensité». Le sens algébrique ne correspond au sens du courant que si l'intensité est positive. C'est bien le cas qui figure sur le schéma ci-contre.



### Application n°3

Pour chacun des exemples des paragraphes **B.3 (b)** et **B.3 (c)**, compléter les schémas en indiquant l'orientation des lignes de champ et/ou le sens du courant.

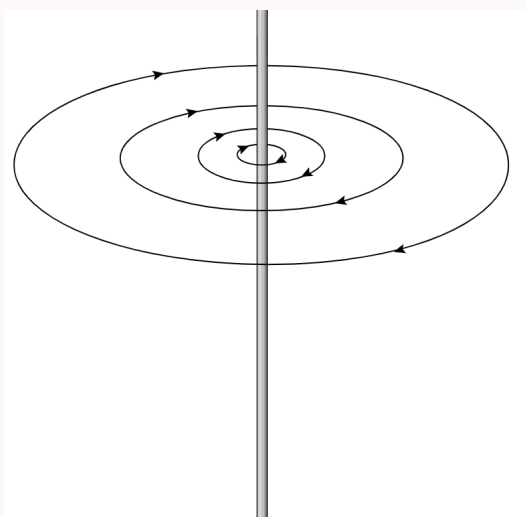
8

**C.3** Influence des invariances spatiales de la distribution de courant

Les invariances spatiales de la distribution de courant se retrouvent dans les cartes de champ.

## Application n°4

1. Voici la carte de champ produite par un fil rectiligne infini en un plan orthogonal au fil. Appliquer la propriété ci-dessus. Préciser également le sens du courant.



2. Pour chacun des exemples **B.3 (b)** et **B.3 (c)**, identifier les invariances de la distribution de courant, et illustrer la propriété énoncée ci-dessus.



9

## C.4 Propriétés de symétrie et d'antisymétrie

### a. Définitions préalables

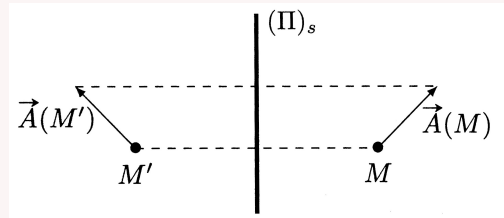
#### Définitions

Soit un champ vectoriel  $\vec{A}(M)$  de nature physique quelconque.

#### ► Plan de symétrie

Soient deux points  $M$  et  $M'$  symétriques l'un de l'autre par rapport à un plan  $(\Pi)_s$ .

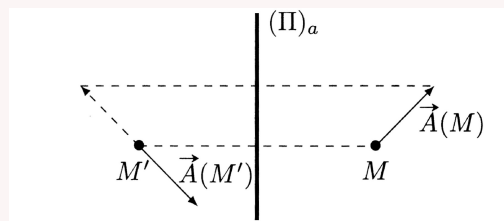
$(\Pi)_s$  est un plan de symétrie du champ  $\vec{A}$  si  $\vec{A}(M')$  est le vecteur symétrique de  $\vec{A}(M)$ .



#### ► Plan d'antisymétrie

Soient deux points  $M$  et  $M'$  symétriques l'un de l'autre par rapport à un plan  $(\Pi)_a$ .

$(\Pi)_a$  est un plan d'antisymétrie du champ  $\vec{A}$  si  $\vec{A}(M')$  est égal à l'opposé du vecteur symétrique de  $\vec{A}(M)$ .



### b. Influence de la symétrie ou de l'antisymétrie de la distribution de courant

#### ► Conséquences de la symétrie de la distribution de courant

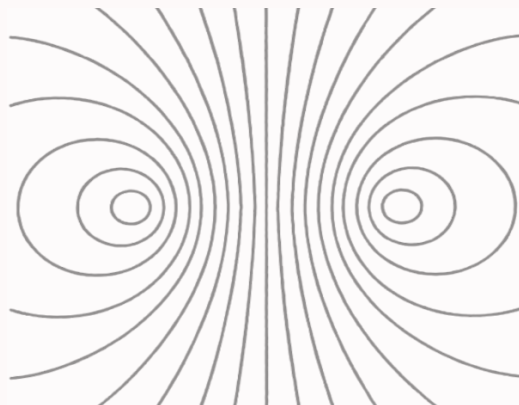
- Tout plan de symétrie pour la distribution de courant est un plan d'antisymétrie pour le champ magnétique produit.
- En tout point d'un plan de symétrie de la source de courant, le champ magnétique est perpendiculaire à ce plan.

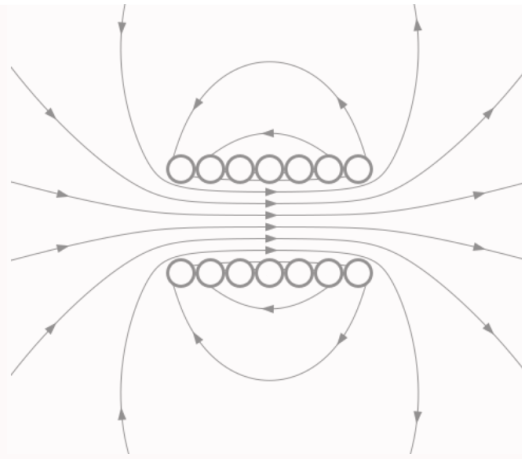
#### ► Conséquences de l'antisymétrie de la distribution de courant

- Tout plan d'antisymétrie pour la distribution de courant est un plan de symétrie pour le champ magnétique produit.
- En tout point d'un plan d'antisymétrie de la source de courant, le champ magnétique est contenu dans ce plan.

#### Application n°5

Pour chacun des exemples **B.3 (b)** et **B.3 (c)**, identifier les plans de symétrie et/ou d'antisymétrie de la distribution de courant, et illustrer les propriétés énoncées ci-dessus.





## D Moment magnétique

### D.1 Définition

#### ► Allure de champs magnétiques à grande distance

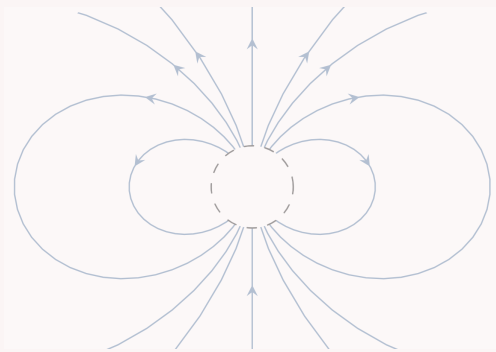
Lorsqu'on s'intéresse aux cartes de champ de différentes sources magnétiques (aimant, spire circulaire, bobine), on constate de fortes similitudes sur la structure des lignes de champ.

#### Définition

À grande distance notamment, on peut montrer que les champs de ces différentes sources magnétiques peuvent se mettre sous une même forme mathématique en repérage sphérique (expression **non exigible**) :

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

en définissant le moment magnétique  $\vec{\mathcal{M}} = \mathcal{M} \vec{u}_z$  propre à la source de champ.



Il en résulte que deux sources de champ magnétique de constitutions différentes, produisent le même champ à grande distance si leurs moments magnétiques respectifs sont égaux.

La notion de moment magnétique permet d'unifier à grande distance la description de certaines sources de champ magnétique pourtant de natures différentes.

**(R)** Plus précisément, on parle de *moment magnétique dipolaire* car tout se passe comme si on avait à faire à un aimant avec ses deux pôles magnétiques.

#### ► Ordres de grandeur

| Source magnétique | moment magnétique $\mathcal{M}$   |
|-------------------|-----------------------------------|
| Boussole          | $1 \cdot 10^{-2} \text{ A.m}^2$   |
| Aimant            | $1 \text{ A.m}^2$                 |
| Terre             | $7,5 \cdot 10^{22} \text{ A.m}^2$ |

