

# Champ magnétique

Julien Cubizolles

Lycée Louis le Grand

lundi 30 mai 2022

# Champ magnétique

Julien Cubizolles

Lycée Louis le Grand

lundi 30 mai 2022



- ▶ on connaît les aimants **droits** (fermeture de porte), « plats » (frigo), les boussoles

- ▶ on connaît les aimants **droits** (fermeture de porte), « plats » (frigo), les boussoles
- ▶ leur champ magnétique est la manifestation macroscopique de champs magnétiques atomiques qui s'ajoutent, pour les matériaux dits **ferromagnétiques**

- ▶ on connaît les aimants **droits** (fermeture de porte), « plats » (frigo), les boussoles
- ▶ leur champ magnétique est la manifestation macroscopique de champs magnétiques atomiques qui s'ajoutent, pour les matériaux dits **ferromagnétiques**
- ▶ aimants **microscopiques** utilisés pour les disques durs par exemple

- ▶ on connaît les aimants **droits** (fermeture de porte), « plats » (frigo), les boussoles
- ▶ leur champ magnétique est la manifestation macroscopique de champs magnétiques atomiques qui s'ajoutent, pour les matériaux dits **ferromagnétiques**
- ▶ aimants **microscopiques** utilisés pour les disques durs par exemple
- ▶ aimants **permanents macroscopiques** pour les fermetures de porte, **électroaimants** pour l'imagerie médicale et les accélérateurs de physique des particules

- ▶ on connaît les aimants **droits** (fermeture de porte), « plats » (frigo), les boussoles
- ▶ leur champ magnétique est la manifestation macroscopique de champs magnétiques atomiques qui s'ajoutent, pour les matériaux dits **ferromagnétiques**
- ▶ aimants **microscopiques** utilisés pour les disques durs par exemple
- ▶ aimants **permanents macroscopiques** pour les fermetures de porte, **électroaimants** pour l'imagerie médicale et les accélérateurs de physique des particules
- ▶ champ magnétique terrestre dû à des courants dans le noyau liquide



- ▶ dans le cours sur la force de Lorentz, on a vu son effet sur un aimant

- ▶ dans le cours sur la force de Lorentz, on a vu son effet sur un aimant
- ▶ on va « observer » le champ  $\vec{B}$  avec des aiguilles de boussole et présenter les outils de représentation d'un **champ vectoriel**

- ▶ dans le cours sur la force de Lorentz, on a vu son effet sur un aimant
- ▶ on va « observer » le champ  $\vec{B}$  avec des aiguilles de boussole et présenter les outils de représentation d'un **champ vectoriel**
- ▶ on distinguera des propriétés générales, mais sans rien calculer (2<sup>e</sup> année)

- ▶ dans le cours sur la force de Lorentz, on a vu son effet sur un aimant
- ▶ on va « observer » le champ  $\vec{B}$  avec des aiguilles de boussole et présenter les outils de représentation d'un **champ vectoriel**
- ▶ on distinguera des propriétés générales, mais sans rien calculer (2<sup>e</sup> année)
- ▶ on verra le champ des structures fondamentales : fil, spire, bobines de Helmholtz, solénoïde

# 1. Caractéristiques générales du champ magnétique

## 2. Configurations usuelles

## 3. Moment magnétique

# 1. Caractéristiques générales du champ magnétique

## 1.1 Sources du champ

## 1.2 Visualisation

## 1.3 Intensité du champ magnétique

## 1.4 Symétries des courants et du champ magnétique

# 2. Configurations usuelles

# 3. Moment magnétique

# Expérience d'Ørsted

- ▶ un aimant droit fixe l'orientation d'une boussole

# Expérience d'Ørsted

- ▶ un aimant droit fixe l'orientation d'une boussole
- ▶ un courant dans un fil rectiligne a le même effet : il produit lui aussi un **champ magnétique**

# Expérience d'Ørsted

- ▶ un aimant droit fixe l'orientation d'une boussole
- ▶ un courant dans un fil rectiligne a le même effet : il produit lui aussi un **champ magnétique**
- ▶ son intensité  $B$  est d'autant plus grande que la fréquence d'oscillation de la boussole est grande :

# Expérience d'Ørsted

- ▶ un aimant droit fixe l'orientation d'une boussole
- ▶ un courant dans un fil rectiligne a le même effet : il produit lui aussi un **champ magnétique**
- ▶ son intensité  $B$  est d'autant plus grande que la fréquence d'oscillation de la boussole est grande :
  - ▶  $B$  croît quand on est proche du fil

# Expérience d'Ørsted

- ▶ un aimant droit fixe l'orientation d'une boussole
- ▶ un courant dans un fil rectiligne a le même effet : il produit lui aussi un **champ magnétique**
- ▶ son intensité  $B$  est d'autant plus grande que la fréquence d'oscillation de la boussole est grande :
  - ▶  $B$  croît quand on est proche du fil
  - ▶  $B$  croît quand l'intensité  $I$  croît

# Expérience d'Ørsted

- ▶ un aimant droit fixe l'orientation d'une boussole
- ▶ un courant dans un fil rectiligne a le même effet : il produit lui aussi un **champ magnétique**
- ▶ son intensité  $B$  est d'autant plus grande que la fréquence d'oscillation de la boussole est grande :
  - ▶  $B$  croît quand on est proche du fil
  - ▶  $B$  croît quand l'intensité  $I$  croît
- ▶ la direction de la position d'équilibre de la boussole donne celle de  $\vec{B}$  :

# Expérience d'Ørsted

- ▶ un aimant droit fixe l'orientation d'une boussole
- ▶ un courant dans un fil rectiligne a le même effet : il produit lui aussi un **champ magnétique**
- ▶ son intensité  $B$  est d'autant plus grande que la fréquence d'oscillation de la boussole est grande :
  - ▶  $B$  croît quand on est proche du fil
  - ▶  $B$  croît quand l'intensité  $I$  croît
- ▶ la direction de la position d'équilibre de la boussole donne celle de  $\vec{B}$  :
  - ▶ la direction de  $\vec{B}$  dépend de la position

# Expérience d'Ørsted

- ▶ un aimant droit fixe l'orientation d'une boussole
- ▶ un courant dans un fil rectiligne a le même effet : il produit lui aussi un **champ magnétique**
- ▶ son intensité  $B$  est d'autant plus grande que la fréquence d'oscillation de la boussole est grande :
  - ▶  $B$  croît quand on est proche du fil
  - ▶  $B$  croît quand l'intensité  $I$  croît
- ▶ la direction de la position d'équilibre de la boussole donne celle de  $\vec{B}$  :
  - ▶ la direction de  $\vec{B}$  dépend de la position
  - ▶  $\vec{B}$  « tourne » autour du fil

# Expérience d'Ørsted

- ▶ un aimant droit fixe l'orientation d'une boussole
- ▶ un courant dans un fil rectiligne a le même effet : il produit lui aussi un **champ magnétique**
- ▶ son intensité  $B$  est d'autant plus grande que la fréquence d'oscillation de la boussole est grande :
  - ▶  $B$  croît quand on est proche du fil
  - ▶  $B$  croît quand l'intensité  $I$  croît
- ▶ la direction de la position d'équilibre de la boussole donne celle de  $\vec{B}$  :
  - ▶ la direction de  $\vec{B}$  dépend de la position
  - ▶  $\vec{B}$  « tourne » autour du fil
  - ▶ le sens est donné par la **règle de la main droite**

# 1. Caractéristiques générales du champ magnétique

## 1.1 Sources du champ

## 1.2 Visualisation

## 1.3 Intensité du champ magnétique

## 1.4 Symétries des courants et du champ magnétique

# 2. Configurations usuelles

# 3. Moment magnétique

# Champ vectoriel

## Définition (Champ vectoriel)

Le champ magnétique est un **champ vectoriel** associant à tout **point**  $M$  de l'espace un **vecteur** de  $\mathbb{R}^3$ .

il « suffit » de placer une aiguille de boussole en chaque point pour déterminer son sens et sa direction...

# Limaille de fer

- ▶ des « copeaux » de fer (limaille) dans un champ  $\vec{B}$  s'aimantent

# Limaille de fer

- ▶ des « copeaux » de fer (limaille) dans un champ  $\vec{B}$  s'aimantent
- ▶ ils s'alignent comme des aiguilles de boussole, et s'agglomèrent pour former des « lignes de champ »

# Limaille de fer

- ▶ des « copeaux » de fer (limaille) dans un champ  $\vec{B}$  s'aimantent
- ▶ ils s'alignent comme des aiguilles de boussole, et s'agglomèrent pour former des « lignes de champ »
- ▶ ils ne fournissent aucune information sur l'intensité de  $\vec{B}$

# Limaille de fer

- ▶ des « copeaux » de fer (limaille) dans un champ  $\vec{B}$  s'aimantent
- ▶ ils s'alignent comme des aiguilles de boussole, et s'agglomèrent pour former des « lignes de champ »
- ▶ ils ne fournissent aucune information sur l'intensité de  $\vec{B}$

## Définition (Ligne de champ)

Une ligne de champ  $\vec{B}$  est une courbe  $\mathcal{C}$  de l'espace telle qu'en chacun de ses points  $M$  le champ  $\vec{B}(M)$  est tangent à  $\mathcal{C}$ .

# Limaille de fer

- ▶ des « copeaux » de fer (limaille) dans un champ  $\vec{B}$  s'aimantent
- ▶ ils s'alignent comme des aiguilles de boussole, et s'agglomèrent pour former des « lignes de champ »
- ▶ ils ne fournissent aucune information sur l'intensité de  $\vec{B}$

## Définition (Ligne de champ)

Une ligne de champ  $\vec{B}$  est une courbe  $\mathcal{C}$  de l'espace telle qu'en chacun de ses points  $M$  le champ  $\vec{B}(M)$  est tangent à  $\mathcal{C}$ .

tracée approximativement de proche en proche, à partir d'un point particulier

# Cartes de champ magnétique

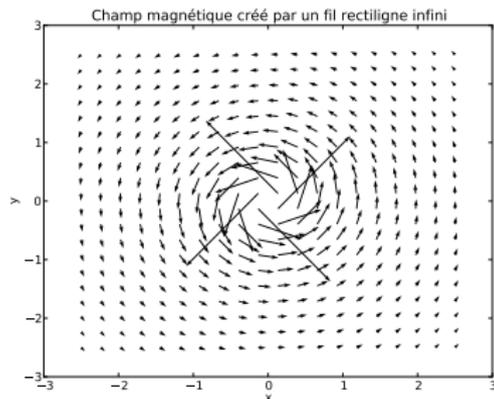
# Cartes de champ magnétique

- ▶ la **loi de Biot et Savart** permet de calculer le champ  $B$  en tout point  $M$  connaissant la distribution du courant en tout point  $P$  (voir plus loin)

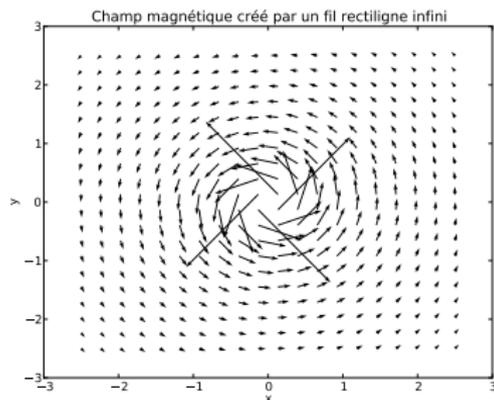
# Cartes de champ magnétique

- ▶ la **loi de Biot et Savart** permet de calculer le champ  $B$  en tout point  $M$  connaissant la distribution du courant en tout point  $P$  (voir plus loin)
- ▶ on représente  $\vec{B}$  dans un plan par une flèche indiquant direction/sens/intensité aux nœuds d'une grille

# Cartes de champ magnétique

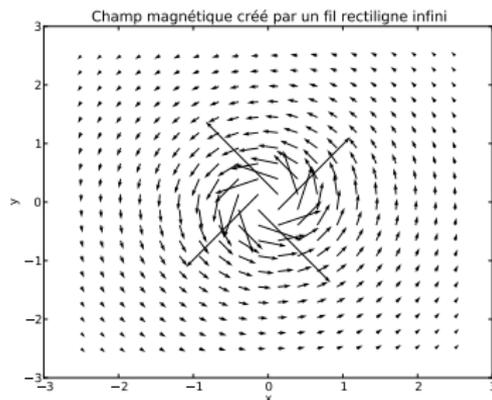


# Cartes de champ magnétique



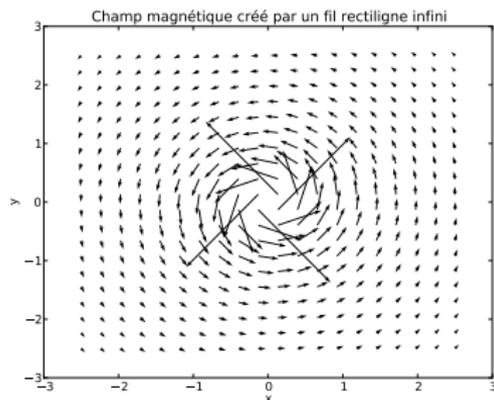
- fil orthogonal au plan et courant « sortant » de la feuille

# Cartes de champ magnétique



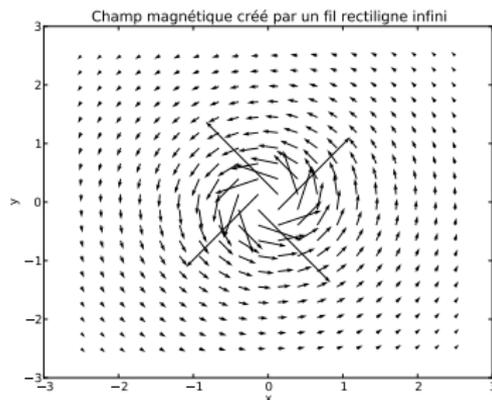
- ▶ fil orthogonal au plan et courant « sortant » de la feuille
- ▶  $\|\vec{B}\|$  invariante par rotation autour du fil, dans un plan orthogonal au fil

# Cartes de champ magnétique



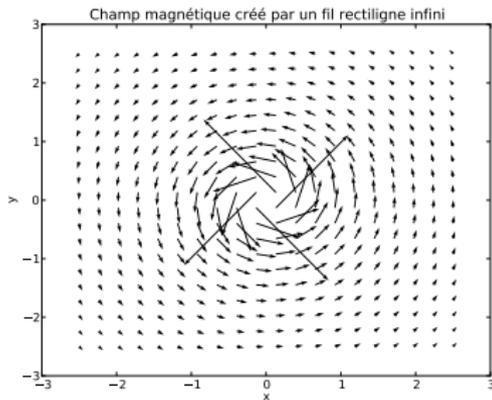
- ▶ fil orthogonal au plan et courant « sortant » de la feuille
- ▶  $\|\vec{B}\|$  invariante par rotation autour du fil, dans un plan orthogonal au fil
- ▶  $\vec{B}$  tourne avec l'espace comme un vecteur de l'espace

# Cartes de champ magnétique



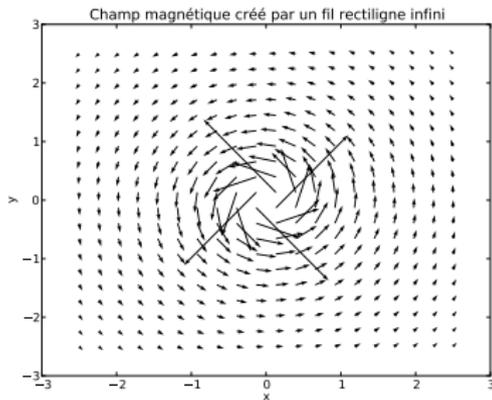
- ▶ fil orthogonal au plan et courant « sortant » de la feuille
- ▶  $\|\vec{B}\|$  invariante par rotation autour du fil, dans un plan orthogonal au fil
- ▶  $\vec{B}$  tourne avec l'espace comme un vecteur de l'espace
- ▶  $\|\vec{B}\|$  varie en  $1/r$  avec  $r$  la distance au centre du fil

# Cartes de champ magnétique



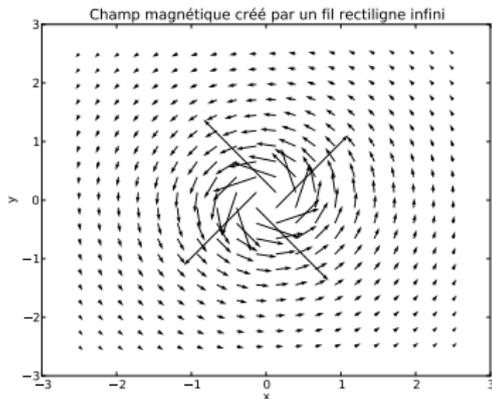
- ▶ fil orthogonal au plan et courant « sortant » de la feuille
- ▶  $\|\vec{B}\|$  invariante par rotation autour du fil, dans un plan orthogonal au fil
- ▶  $\vec{B}$  tourne avec l'espace comme un vecteur de l'espace
- ▶  $\|\vec{B}\|$  varie en  $1/r$  avec  $r$  la distance au centre du fil

# Cartes de champ magnétique



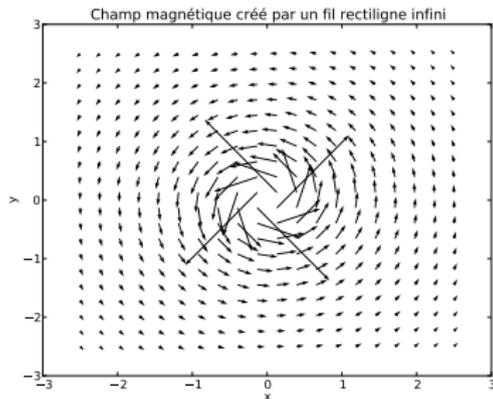
- ▶ fil orthogonal au plan et courant « sortant » de la feuille
  - ▶  $\|\vec{B}\|$  invariante par rotation autour du fil, dans un plan orthogonal au fil
  - ▶  $\vec{B}$  tourne avec l'espace comme un vecteur de l'espace
  - ▶  $\|\vec{B}\|$  varie en  $1/r$  avec  $r$  la distance au centre du fil
- ▶ figure indépendante du plan orthogonal au fil : invariante par translation le long du fil

# Cartes de champ magnétique



- ▶ fil orthogonal au plan et courant « sortant » de la feuille
  - ▶  $\|\vec{B}\|$  **invariante par rotation autour du fil**, dans un plan orthogonal au fil
  - ▶  $\vec{B}$  tourne avec l'espace comme un vecteur de l'espace
  - ▶  $\|\vec{B}\|$  varie en  $1/r$  avec  $r$  la distance au centre du fil
- ▶ figure indépendante du plan orthogonal au fil : **invariance par translation le long du fil**
  - ▶  $\vec{B}(M)$  n'a pas de composante orthogonale au plan

# Cartes de champ magnétique



- ▶ fil orthogonal au plan et courant « sortant » de la feuille
  - ▶  $\|\vec{B}\|$  **invariante par rotation autour du fil**, dans un plan orthogonal au fil
  - ▶  $\vec{B}$  tourne avec l'espace comme un vecteur de l'espace
  - ▶  $\|\vec{B}\|$  varie en  $1/r$  avec  $r$  la distance au centre du fil
- ▶ figure indépendante du plan orthogonal au fil : **invariance par translation le long du fil**
  - ▶  $\vec{B}(M)$  n'a pas de composante orthogonale au plan
  - ▶ ici  $\|\vec{B}\|$  diverge quand  $r \rightarrow 0$  : cette anomalie disparaît quand on tient compte du rayon non nul du fil

# 1. Caractéristiques générales du champ magnétique

## 1.1 Sources du champ

## 1.2 Visualisation

## 1.3 Intensité du champ magnétique

## 1.4 Symétries des courants et du champ magnétique

# 2. Configurations usuelles

# 3. Moment magnétique

# Mesure

- ▶  $\|\vec{B}\|$  s'exprime en T

$$[F] = [qvB] \quad \rightarrow \quad 1\text{T} = 1\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$$

# Mesure

- ▶  $\|\vec{B}\|$  s'exprime en T

$$[F] = [qvB] \quad \rightarrow \quad 1\text{T} = 1\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$$

- ▶ on mesure  $\|\vec{B}\|$  à l'aide d'une sonde à effet Hall

# Mesure

- ▶  $\|\vec{B}\|$  s'exprime en T

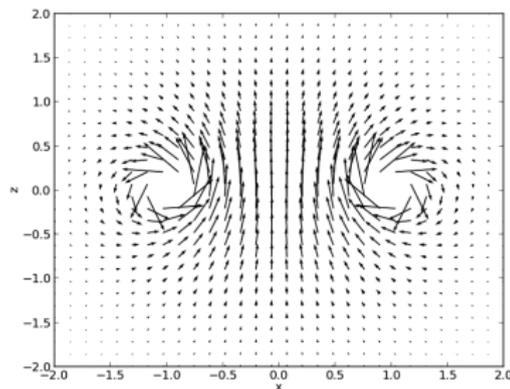
$$[F] = [qvB] \quad \rightarrow \quad 1\text{T} = 1\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$$

- ▶ on mesure  $\|\vec{B}\|$  à l'aide d'une sonde à effet Hall
- ▶ elle indique la composante de  $\vec{B}$  dans la direction où elle pointe

# Ordres de grandeur

- ▶ un champ de 1 T correspond à une très grande intensité, on utilisera également le gauss  $1 \text{ G} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ T}$
- ▶ composante horizontale du champ terrestre  $B_H \simeq 0,2 \text{ G}$ , aimant droit 5 mT, petits aimants très « puissants » : 1 T à la surface.
- ▶ les plus intenses : imagerie médicale, 50 T,  $1 \cdot 10^8 \text{ T}$  dans une étoile à neutrons.

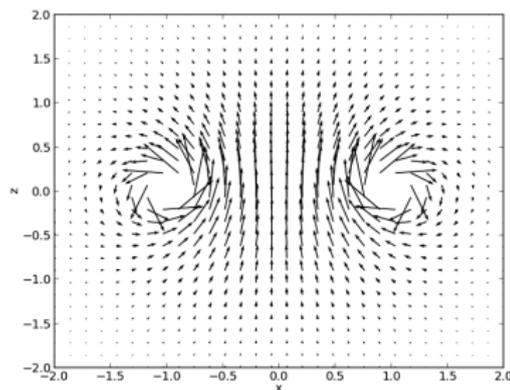
# Sur une carte de champ



Champ d'une spire circulaire.

- ▶ le long d'une ligne de champ, l'intensité maximale dans le plan de la spire

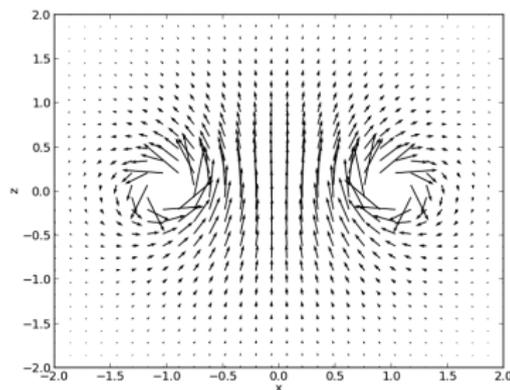
# Sur une carte de champ



Champ d'une spire circulaire.

- ▶ le long d'une ligne de champ, l'intensité maximale dans le plan de la spire
- ▶ la spire « resserre » les lignes de champ :  $\|\vec{B}\|$  est maximale là où elles sont le plus serrées

# Sur une carte de champ



Champ d'une spire circulaire.

- ▶ le long d'une ligne de champ, l'intensité maximale dans le plan de la spire
- ▶ la spire « resserre » les lignes de champ :  $\|\vec{B}\|$  est maximale là où elles sont le plus serrées
- ▶ au voisinage des fils, on retrouve que  $\vec{B}$  leur tourne autour (main droite)

## 1. Caractéristiques générales du champ magnétique

### 1.1 Sources du champ

### 1.2 Visualisation

### 1.3 Intensité du champ magnétique

### 1.4 Symétries des courants et du champ magnétique

## 2. Configurations usuelles

## 3. Moment magnétique

## Cas du champ d'un fil

- ▶ la répartition des courants à l'origine de  $\vec{B}$  présentent souvent des **symétries**
- ▶ elles induisent des propriétés de symétrie sur la structure de  $\vec{B}$ .

# Cas du champ d'un fil

## Cas du champ d'un fil

- ▶ la distribution de courant est **invariante par translation** le long du fil : → de même pour le champ  $\vec{B}$

## Cas du champ d'un fil

- ▶ la distribution de courant est **invariante par translation** le long du fil :  $\rightarrow$  de même pour le champ  $\vec{B}$
- ▶ tout plan contenant le fil est un **plan de symétrie** pour les courants :  $\vec{B}$  en tout point d'un de ces plans est **orthogonal** à ce plan

## Cas du champ d'un fil

- ▶ la distribution de courant est **invariante par translation** le long du fil :  $\rightarrow$  de même pour le champ  $\vec{B}$
- ▶ tout plan contenant le fil est un **plan de symétrie** pour les courants :  $\vec{B}$  en tout point d'un de ces plans est **orthogonal** à ce plan
- ▶ tout plan orthogonal au fil est un **plan de symétrie avec changement de signe** pour les courants :  $\vec{B}$  en tout point d'un de ces plans est **contenu** dans le plan

## Cas du champ d'un fil

- ▶ la distribution de courant est **invariante par translation** le long du fil :  $\rightarrow$  de même pour le champ  $\vec{B}$
- ▶ tout plan contenant le fil est un **plan de symétrie** pour les courants :  $\vec{B}$  en tout point d'un de ces plans est **orthogonal** à ce plan
- ▶ tout plan orthogonal au fil est un **plan de symétrie avec changement de signe** pour les courants :  $\vec{B}$  en tout point d'un de ces plans est **contenu** dans le plan
- ▶ c'est un exemple de conséquence du **principe de Curie**

## Cas du champ d'un fil

- ▶ la distribution de courant est **invariante par translation** le long du fil :  $\rightarrow$  de même pour le champ  $\vec{B}$
- ▶ tout plan contenant le fil est un **plan de symétrie** pour les courants :  $\vec{B}$  en tout point d'un de ces plans est **orthogonal** à ce plan
- ▶ tout plan orthogonal au fil est un **plan de symétrie avec changement de signe** pour les courants :  $\vec{B}$  en tout point d'un de ces plans est **contenu** dans le plan
- ▶ c'est un exemple de conséquence du **principe de Curie**

### Principe de Curie

Lorsque certaines causes produisent certains effets, les éléments de symétrie des causes doivent se retrouver dans les effets produits.

# Symétries planes et invariances

## Définition (Symétries planes)

Un plan  $\Pi^+$  est **plan de symétrie** pour une distribution de courant si, pour tout point  $P$ , en considérant son symétrique  $P'$  par rapport à  $\Pi^+$ , les **courants** en  $P$  et  $P'$  sont **symétriques** l'un de l'autre par rapport à  $\Pi^+$ .

Un plan  $\Pi^-$  est **plan de symétrie avec changement de signe** pour une distribution de courant si, pour tout point  $P$ , en considérant son symétrique  $P'$  par rapport à  $\Pi^-$ , les **courants** en  $P$  et  $P'$  sont **l'opposé du symétrique** l'un de l'autre par rapport à  $\Pi^-$ .

- ▶ pour étudier les symétries du courant entre  $P$  et  $P'$  :
  - ▶ les intensités sont les mêmes
  - ▶ les directions des fils sont les mêmes
  - ▶ le sens du courant est le même (resp. opposé) pour un plan de symétrie (resp. avec changement de signe)
- ▶ tout plan contenant le fil est  $\Pi^+$
- ▶ tout plan perpendiculaire au fil est  $\Pi^-$

# Symétries planes

On montrerait, avec la loi de Biot et Savart, permettant de calculer le champ  $B$  en fonction des courants :

# Symétries planes

## Plan de symétrie

Le champ magnétique créé par une distribution de courants admettant le plan  $\Pi^+$  comme **plan de symétrie** est **symétrique avec changement de signe** par rapport à  $Pi^+$  : en deux points  $M$  et  $M'$  **symétriques par rapport** à  $\Pi^+$ , on a :

$$\vec{B}(M') = -\text{Sym}_{\Pi^+} \vec{B}(M)$$

En particulier, le champ  $\vec{B}(M)$  est **orthogonal** à  $\Pi^+$  pour tout point  $M$  du plan  $\Pi^+$ .

Le champ magnétique créé par une distribution de courants admettant le plan  $\Pi^-$  comme **plan de symétrie avec changement de signe** est **symétrique** par rapport à  $Pi^-$  : en deux points  $M$  et  $M'$  **symétriques par rapport** à  $\Pi^-$ , on a :

$$\vec{B}(M') = +\text{Sym}_{\Pi^-} \vec{B}(M)$$

En particulier, le champ  $\vec{B}(M)$  est **tangent** à  $\Pi^-$  pour tout point  $M$  du

# Symétries planes

- ▶ on le vérifie dans le cas du fil

# Invariances

## Invariances par translation et rotation

Une distribution de courants est **invariante par translation** selon un **axe dirigé par un vecteur  $\vec{e}_z$**  si le courant en un point  $P$  est **indépendant de la coordonnée  $z$**  du point  $P$ .

Une distribution de courants est **invariante par rotation** autour d'un **axe dirigé par un vecteur  $\vec{e}_z$**  si le courant en un point  $P$  est, en coordonnées cylindriques d'axe  $\vec{e}_z$ , **indépendant de la coordonnée  $\theta$**  du point  $P$  autour de l'axe  $\vec{e}_z$ .

On admet que le champ  $\vec{B}$  possède les mêmes propriétés d'invariances que la distribution de courant qui le produit.

- ▶ on le vérifie sur le fil
- ▶ si les invariances ne sont valables que pour des translations de vecteur ou d'angle fini, le champ présente les mêmes invariances par translation ou rotation finie.

1. Caractéristiques générales du champ magnétique

**2. Configurations usuelles**

3. Moment magnétique

## 1. Caractéristiques générales du champ magnétique

## 2. Configurations usuelles

### 2.1 Fil rectiligne infini

### 2.2 Spire

### 2.3 Solénoïde

## 3. Moment magnétique

# Expression

# Expression

- ▶ à  $r$  d'un fil parcouru par  $I$  :  $\|\vec{B}\| \propto I/r$ ; il manque une constante pour la dimension

# Expression

- ▶ à  $r$  d'un fil parcouru par  $I$  :  $\|\vec{B}\| \propto I/r$ ; il manque une constante pour la dimension
- ▶ la **loi de Biot et Savart** (2<sup>e</sup> année) permet de calculer le champ  $B$  en tout point  $M$  connaissant la distribution du courant en tout point  $P$

# Expression

## Champ magnétique d'un fil infini

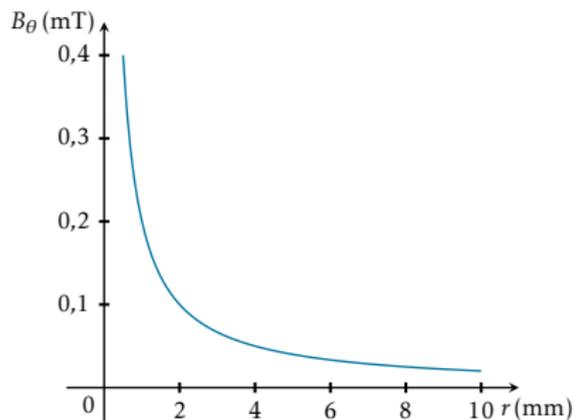
Le champ créé par un fil rectiligne infini parcouru par un courant  $I$  stationnaire est orthoradial :

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

# Expression

- ▶  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$  est la **perméabilité magnétique du vide**
- ▶ ♥ forme générale :  $[B] = \frac{\mu_0 \times \text{intensité}}{\text{longueur}}$

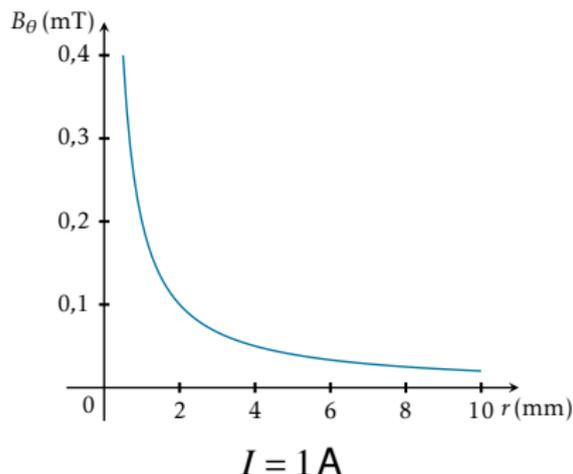
# Courbe



$I = 1 \text{ A}$

- ▶ le T est une « grande » unité (il faut aller à  $0,2 \mu\text{m}$ ) pour  $\|\vec{B}\| \simeq 1 \text{ T}$

# Courbe



- ▶ le T est une « grande » unité (il faut aller à  $0,2 \mu\text{m}$ ) pour  $\|\vec{B}\| \simeq 1 \text{ T}$
- ▶ expression valable si on est suffisamment proche de tout fil non rectiligne

## 1. Caractéristiques générales du champ magnétique

## 2. Configurations usuelles

### 2.1 Fil rectiligne infini

### 2.2 Spire

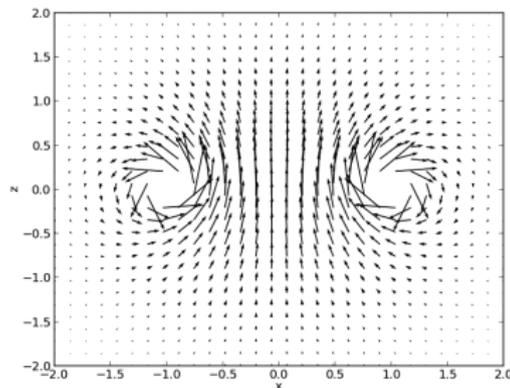
### 2.3 Solénoïde

## 3. Moment magnétique

# Une seule spire

- ▶ on « boucle un fil rectiligne sur lui même »
- ▶ 1 enroulement circulaire de rayon  $R$  parcouru par un courant d'intensité  $I$
- ▶ la contribution fils l'alimentant peut être rendue négligeable (en les entortillant)

# Une seule spire



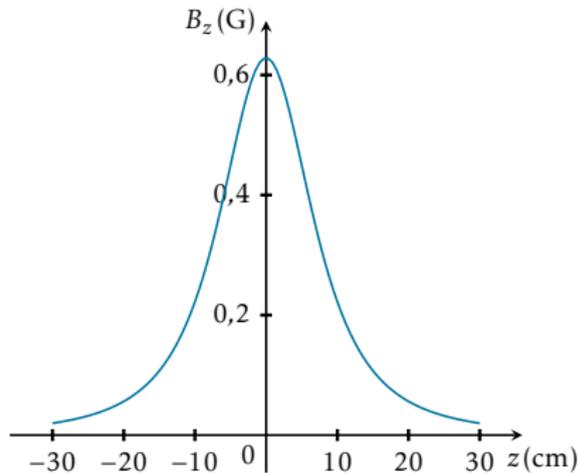
Champ d'une spire circulaire d'axe  $Oz$ .

- ▶ carte du champ dans le plan  $Oxz$
- ▶ on vérifie les symétries
- ▶ on reconnaît le champ du fil au voisinage de  $x = \pm R$
- ▶ invariance par rotation autour de  $Oz$  : on aurait la même dans le plan  $Ozy$
- ▶ on n'a plus l'invariance par translation le long de l'axe  $Oz$
- ▶  $\vec{B}(M) \propto \vec{e}_z$  pour  $M \in (Oz)$  :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2R} \sin^3(\alpha) \vec{e}_z,$$

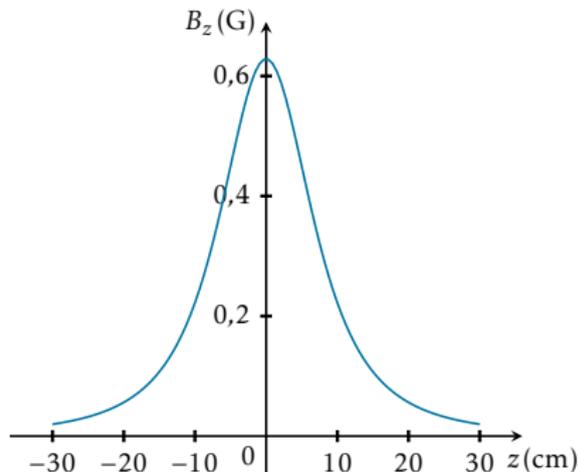
- ▶ nouvelle « règle de la main droite » pour déterminer le

- maximal au centre de la spire



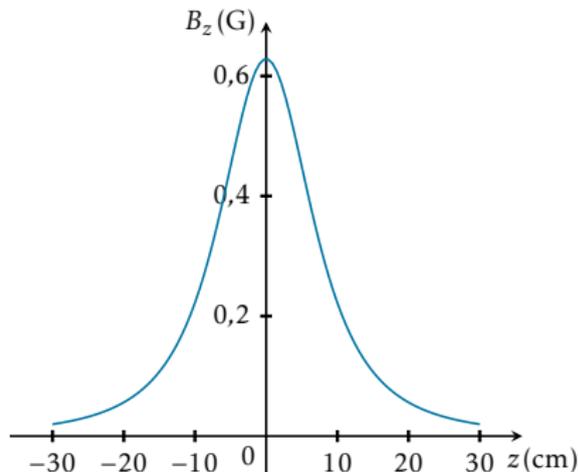
Composante selon  $\vec{e}_z$  du champ  
d'une spire d'axe  $Oz$ . Rayon  
 $R = 10$  cm, intensité  $I = 1$  A.

- ▶ maximal au centre de la spire
- ▶ si on a  $N$  tours, l'intensité est multipliée par  $N$



Composante selon  $\vec{e}_z$  du champ  
d'une spire d'axe  $Oz$ . Rayon  
 $R = 10$  cm, intensité  $I = 1$  A.

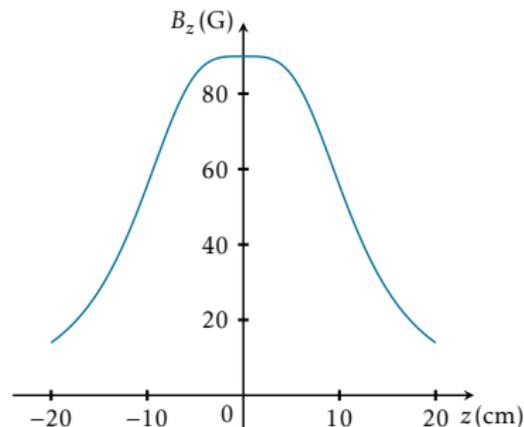
- ▶ maximal au centre de la spire
- ▶ si on a  $N$  tours, l'intensité est multipliée par  $N$
- ▶ pour une spire carré/rectangulaire/... l'ordre de grandeur sera le même



Composante selon  $\vec{e}_z$  du champ  
d'une spire d'axe  $Oz$ . Rayon  
 $R = 10$  cm, intensité  $I = 1$  A.

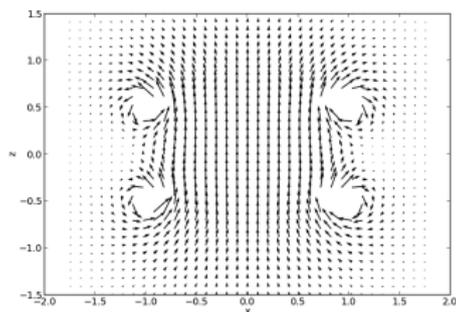
# Configuration de Helmholtz

- ▶ on adoucit les variations de  $\|\vec{B}\|$  sur l'axe en rajoutant une spire identique parallèle et coaxiale à la distance  $D$
- ▶ c'est pour  $D = R$  que  $\|\vec{B}\|$  est la plus uniforme au centre du dispositif



Composante selon  $\vec{e}_z$  du champ d'une paire de bobines d'axe  $Oz$  en configuration Helmholtz. Rayon  $R = 10\text{cm}$ , intensité  $1\text{A}$ , 100 tours.

# Configuration de Helmholtz



- ▶ les lignes de champ sont assez parallèles proche du centre
- ▶ rajouter une bobine « canalise » les lignes de champ magnétique et le rend plus uniforme
- ▶ placer des points illustrant les invariances sur la carte

## 1. Caractéristiques générales du champ magnétique

## 2. Configurations usuelles

### 2.1 Fil rectiligne infini

### 2.2 Spire

### 2.3 Solénoïde

## 3. Moment magnétique

# Champ d'un solénoïde

# Champ d'un solénoïde

- ▶ on accole plusieurs spires identiques pour **canaliser le champ**

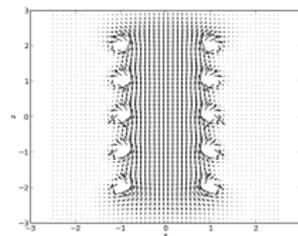
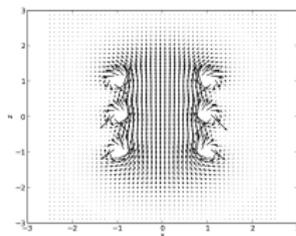
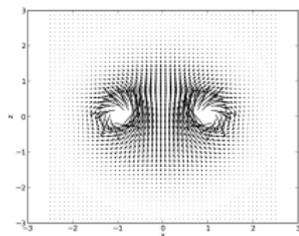
# Champ d'un solénoïde

- ▶ on accole plusieurs spires identiques pour **canaliser le champ**
- ▶ le champ est de plus en plus **uniforme à l'intérieur**, **faible** à l'extérieur

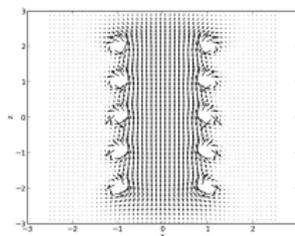
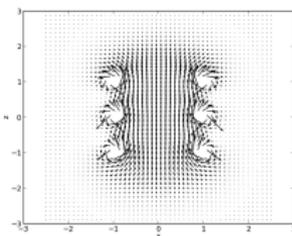
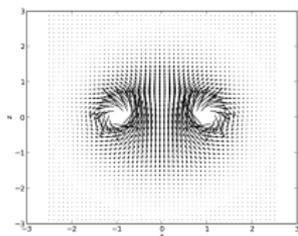
# Champ d'un solénoïde

- ▶ on accole plusieurs spires identiques pour **canaliser le champ**
- ▶ le champ est de plus en plus **uniforme à l'intérieur**, **faible** à l'extérieur
- ▶ l'intensité à l'intérieur est **indépendante du rayon**

# Champ d'un solénoïde



# Champ d'un solénoïde



## Champ d'un solénoïde

Le champ d'un solénoïde infini d'axe  $Oz$ , formé d'un enroulement de  $n$  spires par unité de longueur accolées est

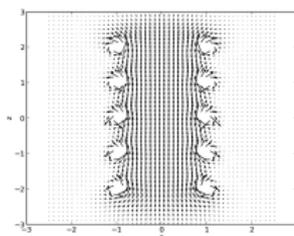
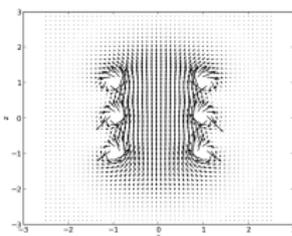
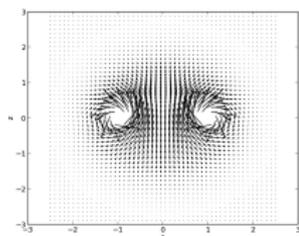
- ▶ uniforme dans le solénoïde,
- ▶ nul à l'extérieur.

À l'intérieur, on a :

$$\vec{B} = \mu_0 n I \vec{e}_z,$$

avec  $I$  l'intensité du courant parcourant chaque spire.

# Champ d'un solénoïde



- ▶ on vérifie les symétries et invariances
- ▶ le sens du champ  $\vec{B}$  est donné par la règle de la main droite de la spire
  - ▶  $n$  est en  $m^{-1}$ , le nombre **total** de spires n'a aucune influence sur l'intensité du champ
  - ▶ expression valable si le solénoïde est assez grand ( $l \gg R$ ), le diamètre des fils négligeable et si on regarde loin des bords
  - ▶ avec  $I = 1 \text{ A}$ ,  $n = 20 \text{ cm}^{-1}$  :  $B = 25 \text{ G}$

1. Caractéristiques générales du champ magnétique
2. Configurations usuelles
3. Moment magnétique

## 1. Caractéristiques générales du champ magnétique

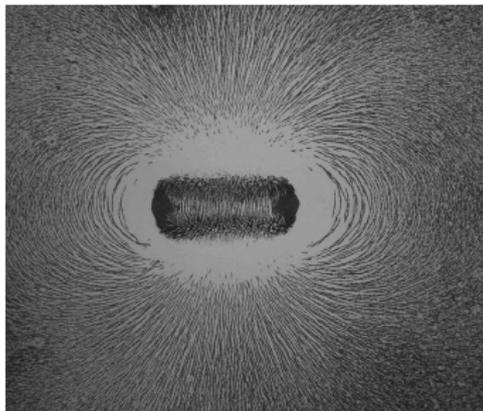
## 2. Configurations usuelles

## 3. Moment magnétique

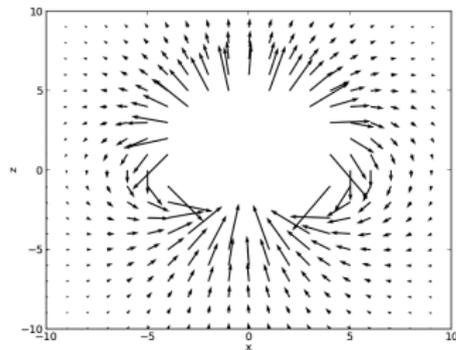
### 3.1 Aimant permanent et spire en champ lointain

### 3.2 Modèle du dipôle magnétique

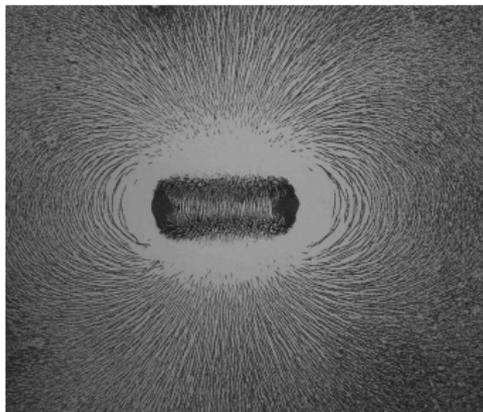
- ▶ on connaissait avant tout le champ d'un aimant permanent
- ▶ sa structure est-elle radicalement différente de celle d'un électro-aimant ?



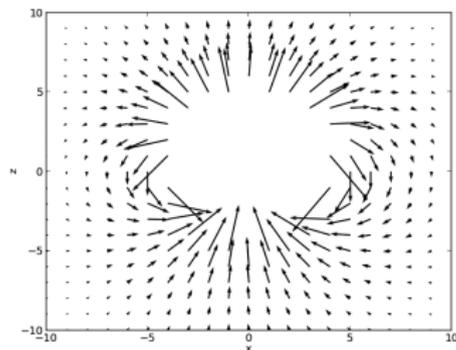
Lignes de champ d'un aimant droit vertical



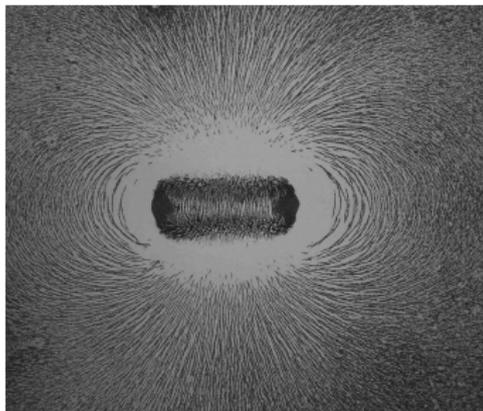
Lignes de champ d'une spire d'axe de révolution vertical, observées à une distance grande devant son rayon



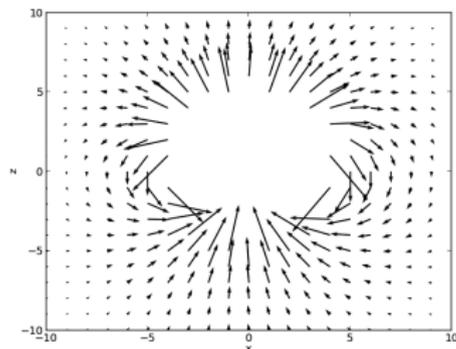
Lignes de champ d'un aimant droit vertical



Lignes de champ d'une spire d'axe de révolution vertical, observées à une distance grande devant son rayon

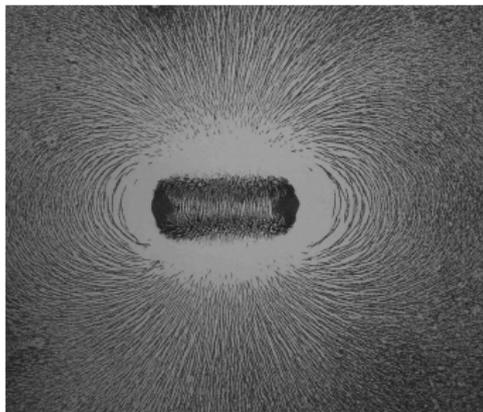


Lignes de champ d'un aimant droit vertical

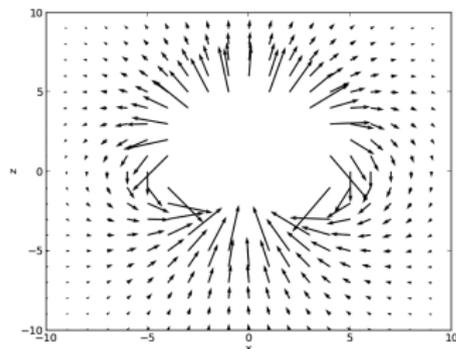


Lignes de champ d'une spire d'axe de révolution vertical, observées à une distance grande devant son rayon

- ▶ structure identique à grande distance pour une spire, une paire de Helmholtz, un solénoïde fini, un aimant droit

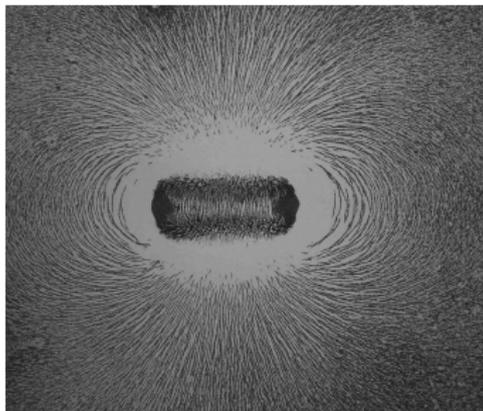


Lignes de champ d'un aimant droit vertical

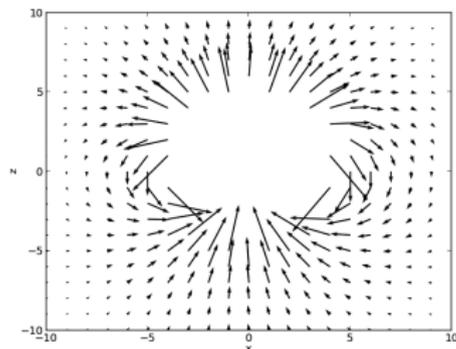


Lignes de champ d'une spire d'axe de révolution vertical, observées à une distance grande devant son rayon

- ▶ structure identique à grande distance pour une spire, une paire de Helmholtz, un solénoïde fini, un aimant droit
- ▶ les lignes de champ **sortent du pôle Nord** et **rentrent dans le pôle Sud**



Lignes de champ d'un aimant droit vertical



Lignes de champ d'une spire d'axe de révolution vertical, observées à une distance grande devant son rayon

- ▶ structure identique à grande distance pour une spire, une paire de Helmholtz, un solénoïde fini, un aimant droit
- ▶ les lignes de champ **sortent du pôle Nord et rentrent dans le pôle Sud**
- ▶ la spire est la « brique fondamentale » des sources de champ magnétique statique comme la charge ponctuelle pour le champ électrique statique

## 1. Caractéristiques générales du champ magnétique

## 2. Configurations usuelles

## 3. Moment magnétique

### 3.1 Aimant permanent et spire en champ lointain

### 3.2 Modèle du dipôle magnétique

# Définition

## Définition (Dipôle et moment magnétiques)

Un **dipôle magnétique** est une spire circulaire plane de rayon  $R$  parcourue par un courant d'intensité  $I$ . Il est caractérisé par son **moment dipolaire magnétique**, noté  $\vec{m}$ , défini par :

$$\vec{m} = IA\vec{e}_z = I\pi R^2\vec{e}_z,$$

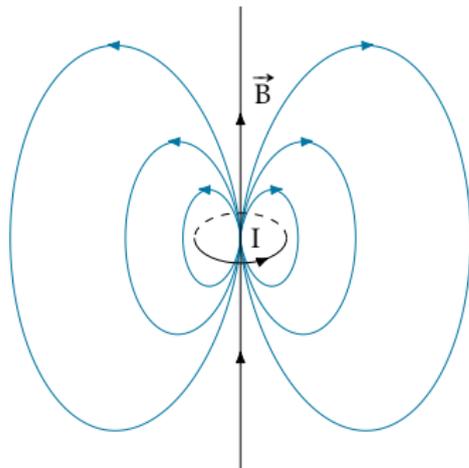
avec :

- ▶  $A = \pi R^2$  la surface de la spire
- ▶  $\|\vec{m}\|$  en  $A \cdot m^2$
- ▶  $\vec{e}_z$  le vecteur normal au plan de la spire, orienté par la **règle de la main droite**

# Approximation dipolaire

## Approximation dipolaire

Quand on l'observe à une distance grande devant ses dimensions caractéristiques, toute boucle de courant plane est équivalente au dipôle magnétique correspondant.

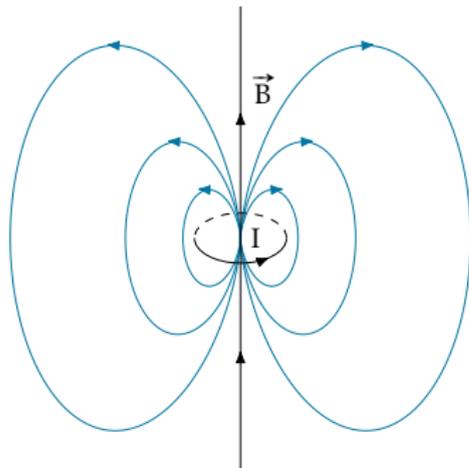


# Approximation dipolaire

## Approximation dipolaire

Quand on l'observe à une distance grande devant ses dimensions caractéristiques, toute boucle de courant plane est équivalente au dipôle magnétique correspondant.

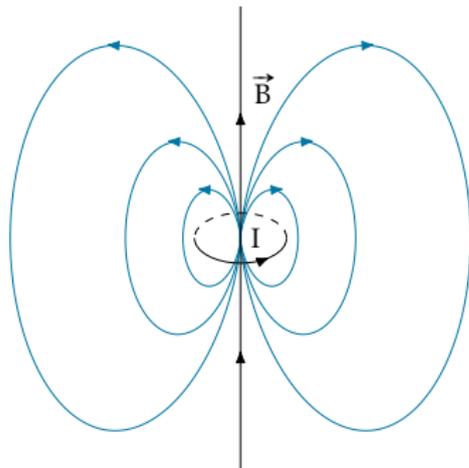
- ▶ pour une spire rectangulaire :  $\vec{m} = Iab\vec{e}_z$



# Approximation dipolaire

## Approximation dipolaire

Quand on l'observe à une distance grande devant ses dimensions caractéristiques, toute boucle de courant plane est équivalente au dipôle magnétique correspondant.



- ▶ pour une spire rectangulaire :  $\vec{m} = Iab\vec{e}_z$
- ▶  $\vec{m}$  suffit pour calculer le champ  $\vec{B}$  créé par le dipôle, la force qu'il subit quand il est placé dans le champ magnétique créé par d'autres sources

# Aimants permanents

# Aimants permanents

- ▶ un électron en mouvement de révolution autour de son noyau (en mécanique classique) constitue un dipôle magnétique, le résultat demeure en mécanique quantique

# Aimants permanents

- ▶ un électron en mouvement de révolution autour de son noyau (en mécanique classique) constitue un dipôle magnétique, le résultat demeure en mécanique quantique
- ▶ le moment magnétique macroscopique dans un matériau ferromagnétique est la somme de ces moments magnétiques atomiques, qui s'alignent quand on l'aimante et restent alignés par leur interaction mutuelle

# Aimants permanents

- ▶ un électron en mouvement de révolution autour de son noyau (en mécanique classique) constitue un dipôle magnétique, le résultat demeure en mécanique quantique
- ▶ le moment magnétique macroscopique dans un matériau ferromagnétique est la somme de ces moments magnétiques atomiques, qui s'alignent quand on l'aimante et restent alignés par leur interaction mutuelle
- ▶ le vecteur moment magnétique est aligné avec l'aimant droit, dirigé du sud vers le nord magnétique

# Aimants permanents

- ▶ un électron en mouvement de révolution autour de son noyau (en mécanique classique) constitue un dipôle magnétique, le résultat demeure en mécanique quantique
- ▶ le moment magnétique macroscopique dans un matériau ferromagnétique est la somme de ces moments magnétiques atomiques, qui s'alignent quand on l'aimante et restent alignés par leur interaction mutuelle
- ▶ le vecteur moment magnétique est aligné avec l'aimant droit, dirigé du sud vers le nord magnétique
- ▶ on caractérise un matériau par son **aimantation** notée  $\mathcal{M}$ , moment magnétique par unité de volume

# Aimants permanents

- ▶ un électron en mouvement de révolution autour de son noyau (en mécanique classique) constitue un dipôle magnétique, le résultat demeure en mécanique quantique
- ▶ le moment magnétique macroscopique dans un matériau ferromagnétique est la somme de ces moments magnétiques atomiques, qui s'alignent quand on l'aimante et restent alignés par leur interaction mutuelle
- ▶ le vecteur moment magnétique est aligné avec l'aimant droit, dirigé du sud vers le nord magnétique
- ▶ on caractérise un matériau par son **aimantation** notée  $\mathcal{M}$ , moment magnétique par unité de volume
- ▶  $\mathcal{M}$  est dans le sens sud-nord pour un aimant droit

# Aimants permanents

- ▶ un électron en mouvement de révolution autour de son noyau (en mécanique classique) constitue un dipôle magnétique, le résultat demeure en mécanique quantique
- ▶ le moment magnétique macroscopique dans un matériau ferromagnétique est la somme de ces moments magnétiques atomiques, qui s'alignent quand on l'aimante et restent alignés par leur interaction mutuelle
- ▶ le vecteur moment magnétique est aligné avec l'aimant droit, dirigé du sud vers le nord magnétique
- ▶ on caractérise un matériau par son **aimantation** notée  $\mathcal{M}$ , moment magnétique par unité de volume
- ▶  $\mathcal{M}$  est dans le sens sud-nord pour un aimant droit
- ▶ un aimant brisé donne deux aimants...

# Aimants permanents

## Ordres de grandeur

dimensionnellement : le champ magnétique caractéristique (à la surface) est  $B \simeq \mu_0 \mathcal{M}$

	$\mathcal{M}$	$B$
acier	$\simeq 1 \cdot 10^4 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$	$\simeq 1 \cdot 10^{-2} \text{ T}$
ferrite (céramique d'oxyde de fer)	$\simeq 2 \cdot 10^5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$	$\simeq 2 \cdot 10^{-1} \text{ T}$
Alnico (alliages AlNiCo)	$\simeq 1 \cdot 10^5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$	$\simeq 0,1 \text{ T}$
aimants au néodyme ( alliage NdFeB)	$\simeq 1 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$	$\simeq 1 \text{ T}$

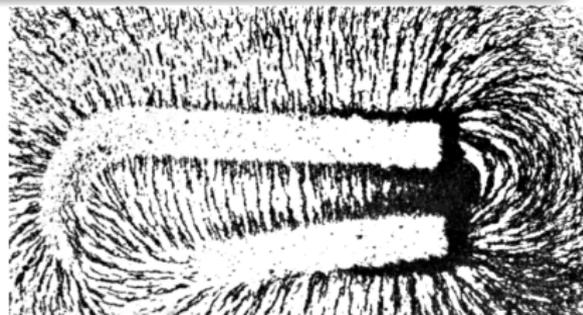
# Aimants permanents

## Ordres de grandeur

dimensionnellement : le champ magnétique caractéristique (à la surface) est  $B \approx \mu_0 \mathcal{M}$

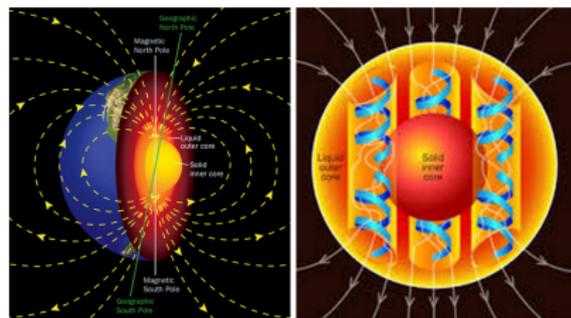
	$\mathcal{M}$	$B$
acier	$\approx 1 \cdot 10^4 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$	$\approx 1 \cdot 10^{-2} \text{ T}$
ferrite (céramique d'oxyde de fer)	$\approx 2 \cdot 10^5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$	$\approx 2 \cdot 10^{-1} \text{ T}$
Alnico (alliages AlNiCo)	$\approx 1 \cdot 10^5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$	$\approx 0,1 \text{ T}$
aimants au néodyme ( alliage NdFeB)	$\approx 1 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$	$\approx 1 \text{ T}$

on peut courber un aimant droit  
pour obtenir une zone de champ  
quasi-uniforme dans un aimant en  
U



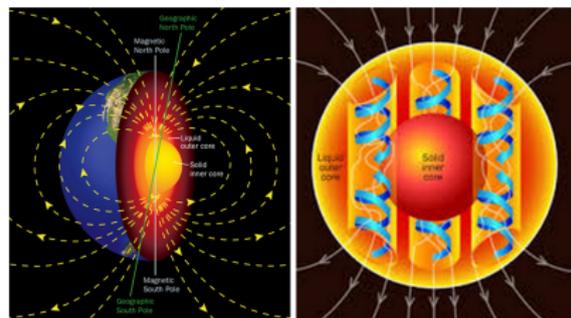
# Champ magnétique terrestre

- ▶ le champ magnétique terrestre est dû aux courants dans la partie liquide du noyau



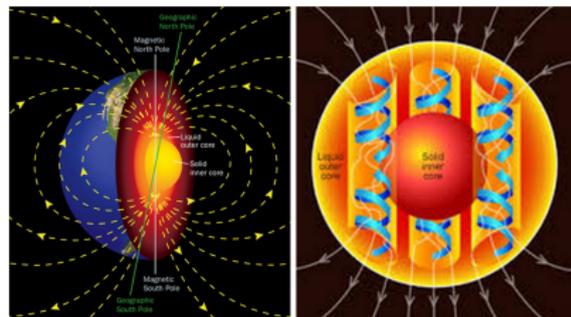
# Champ magnétique terrestre

- ▶ le champ magnétique terrestre est dû aux courants dans la partie liquide du noyau
- ▶ structure proche d'un dipôle magnétique : ☠ le pôle nord **magnétique** est le pôle sud **géographique**



# Champ magnétique terrestre

- ▶ le champ magnétique terrestre est dû aux courants dans la partie liquide du noyau
- ▶ structure proche d'un dipôle magnétique : ☠ le pôle nord **magnétique** est le pôle sud **géographique**
- ▶ ordre de grandeur à la surface terrestre  $B = 0,48 \text{ G}$  et une composante horizontale  $B_H = 0,2 \text{ G}$



# Indispensable

- ▶  $\vec{B}$  tourne autour des courants, son sens est donné par la règle de la main droite
- ▶  $\|\vec{B}\|$  croît quand on s'approche des fils, elle y diverge s'ils sont de rayon nul
- ▶  $\|\vec{B}\|$  augmente le long d'une ligne de champ quand les lignes de champ se resserrent
- ▶  $[B] = \frac{\mu_0 \times \text{intensité}}{\text{longueur}}$
- ▶  $\vec{m} = IS\vec{e}_z$  pour un dipôle magnétique