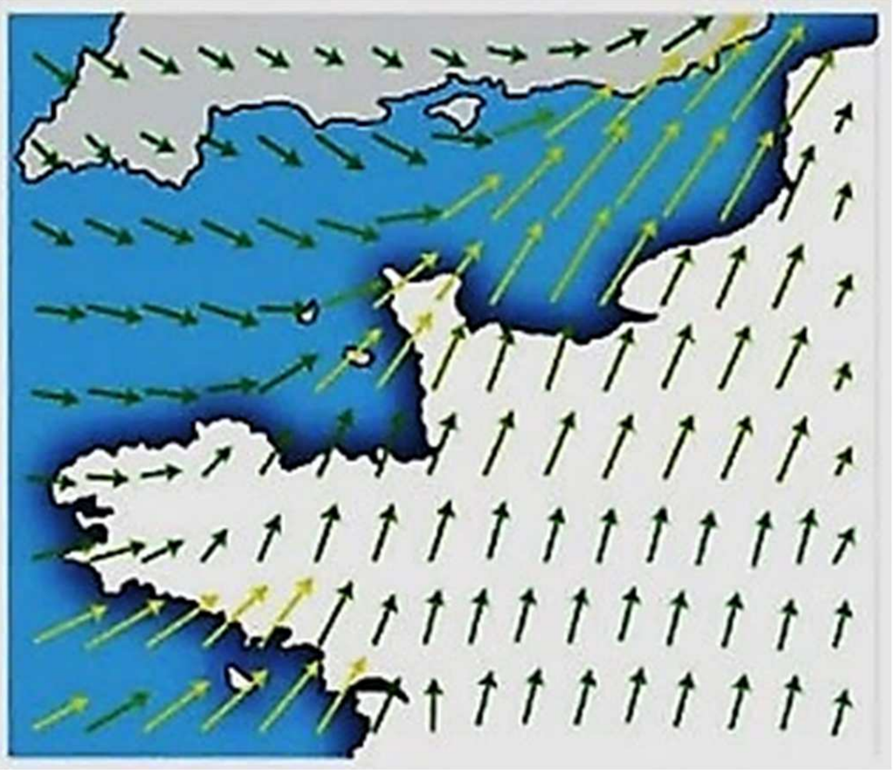
Thème : Induction et forces de Laplace

Le champ magnétique
et
ses actions

Rappel: les champs vectoriels en physique

Champ vectoriel

C'est une fonction de plusieurs variables qui associe un vecteur à chaque point de l'espace



Définition : Le champ magnétique

Définition : Champ magnétique permanent (magnétostatique)

Le ***champ magnétique*** est un ***champ vectoriel*** : en tout point M de l'espace il existe un vecteur $\vec{B}(M)$ décrivant localement le champ magnétique.

- Le sens et la direction du vecteur indique comment la boussole se positionne.
- La norme du vecteur renseigne sur l'intensité du champ magnétique au point M considéré. Elle s'exprime en ***tesla*** (T).

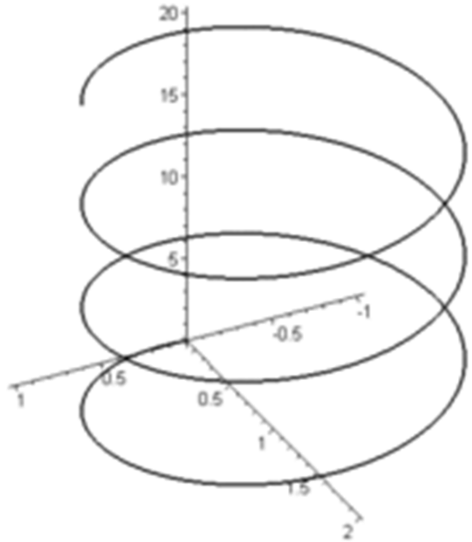
Il faut une boussole/aiguille aimantée pour visualiser la direction du champ en un point donné.

Définition : Le champ magnétique

Définition plus fondamentale : Champ magnétique

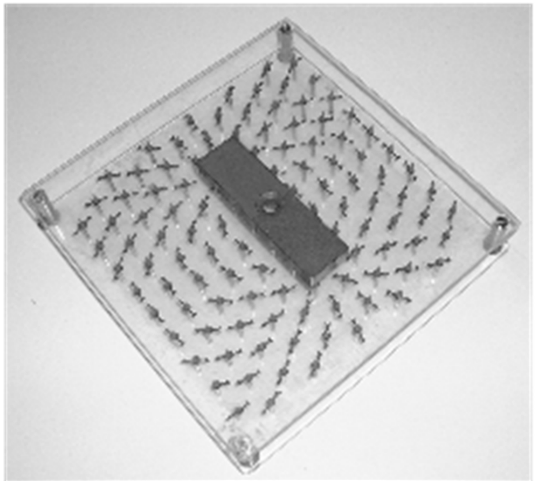
Le ***champ magnétique*** $\vec{B}$ est défini par la composante magnétique de la ***force de Lorentz*** $\overrightarrow{F_L}$ qu'il exerce sur une particule chargée de charge q et animée d'une vitesse $\vec{v}$ dans le référentiel du champ :

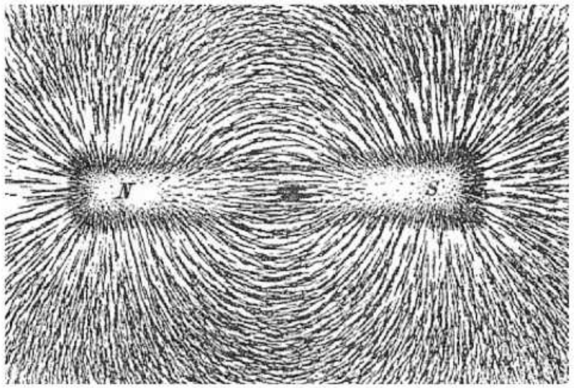
$$\overrightarrow{F_L} = q.\vec{v} \wedge \vec{B}$$



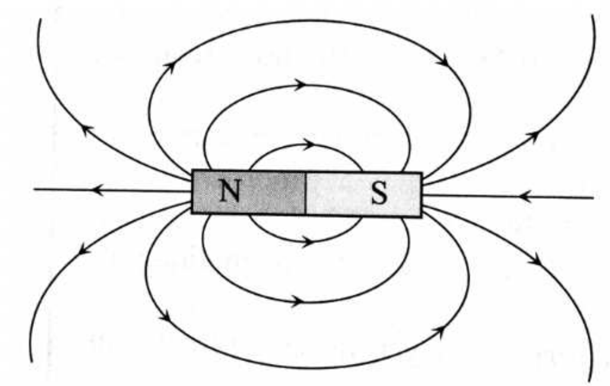
Permet de rendre mesurable l'intensité du champ.

Visualisation du champ magnétique : carte de champ



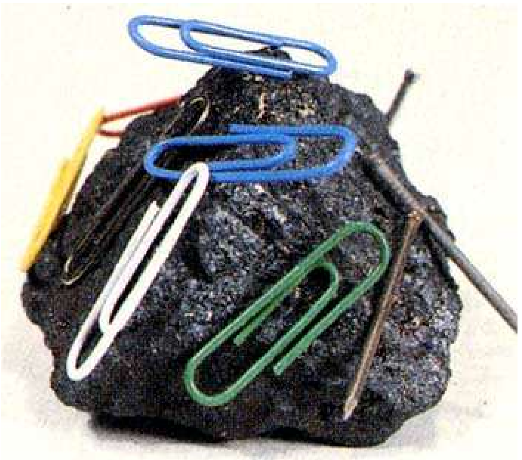


Spectre magnétique d'un aimant droit



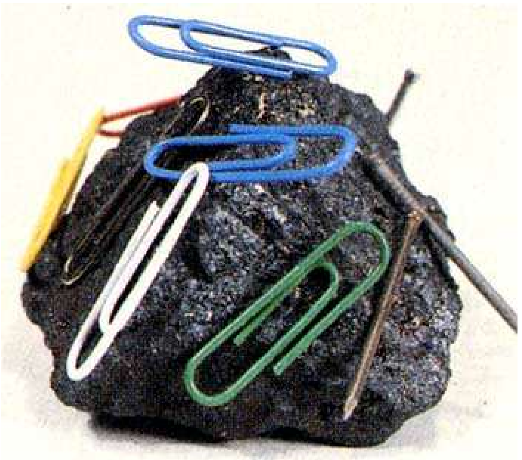
Carte de champ d'un aimant droit

Sources de champ magnétique



Depuis l'antiquité

Sources de champ magnétique

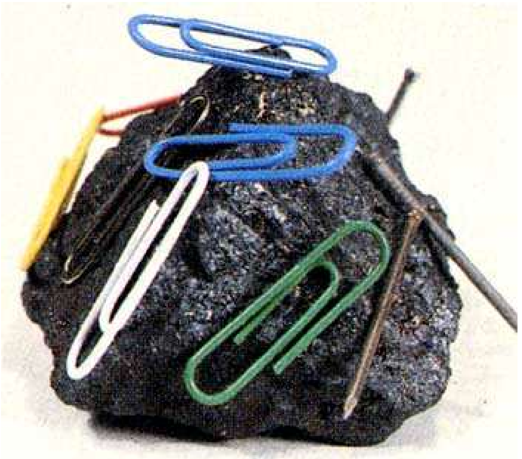


Depuis l’antiquité

Un peu de mise en forme
Changement de matériau

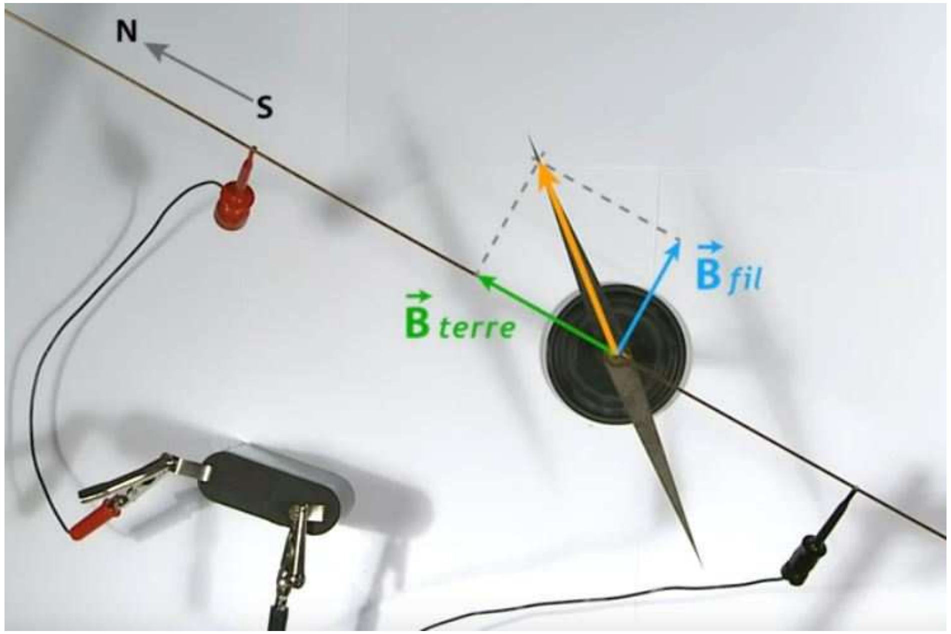
Sources de champ magnétique

En 1820 : expérience d'Ørsted !



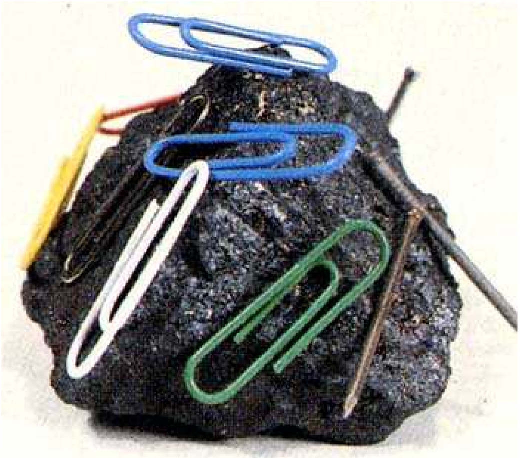
Depuis l'antiquité

Un peu de mise en forme
Changement de matériau



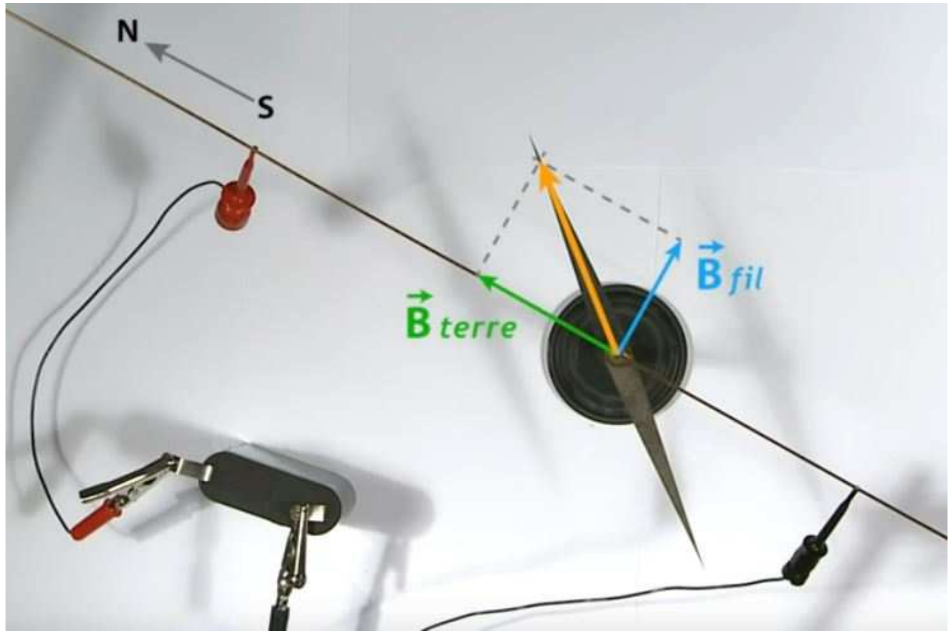
Sources de champ magnétique

En 1820 : expérience d'Ørsted !



Depuis l'antiquité

Un peu de mise en forme
Changement de matériau



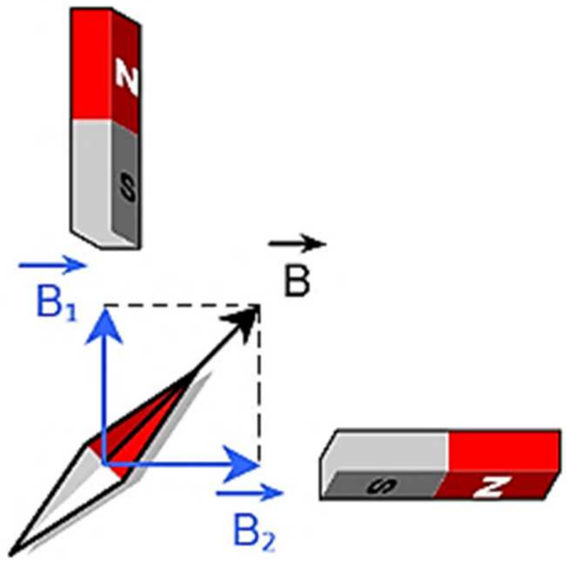
Un courant électrique peut
créer un champ magnétique!

Sources de champ magnétique

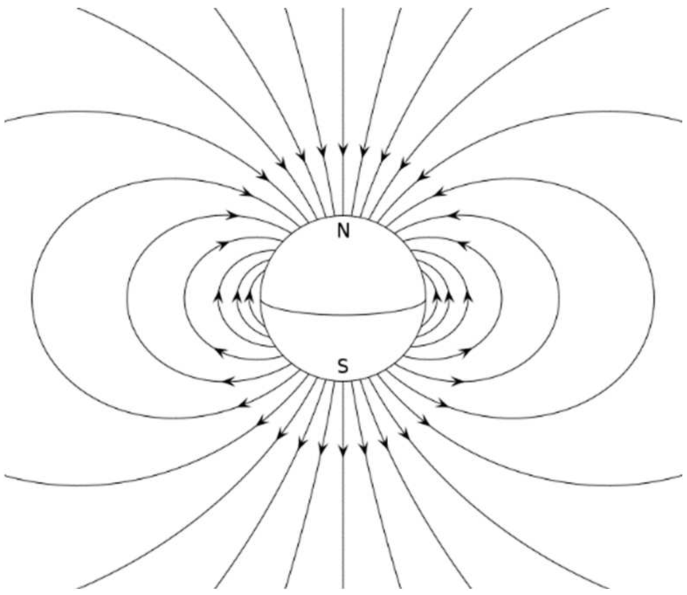
Propriétés : Principe de superposition

Dans un milieu linéaire, si plusieurs sources de champ magnétique sont présentes, leurs contributions s'ajoutent (somme vectorielle) :

$$\overrightarrow{B_{tot}} = \overrightarrow{B_1} + \overrightarrow{B_2}$$

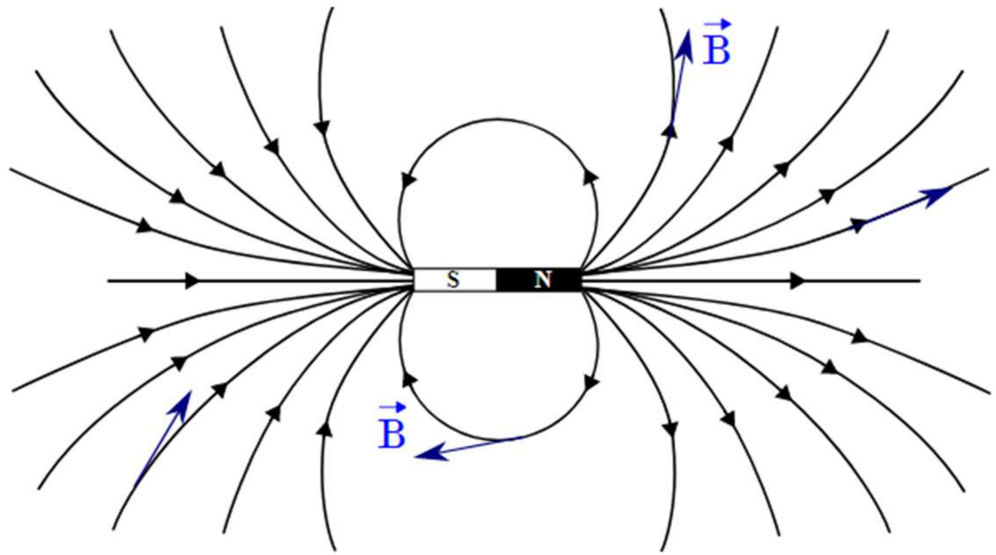


Retour sur les cartes de champ



Définition : Ligne de champ

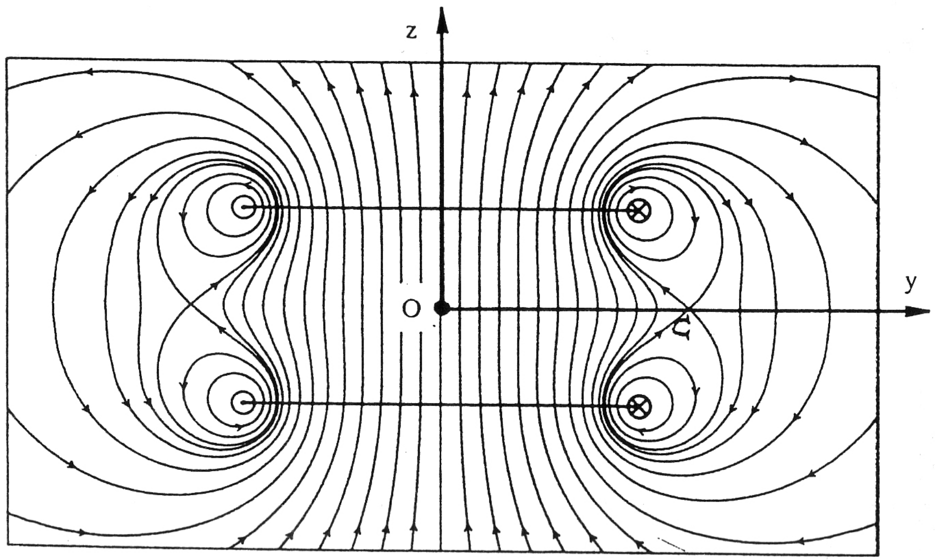
- Une ***ligne de champ*** magnétique est une courbe ***tangente*** en tout point au champ magnétique. Elle est orientée dans le ***sens du vecteur champ magnétique***.



Savoir lire une carte de champ

Méthode : Savoir lire une carte de champ

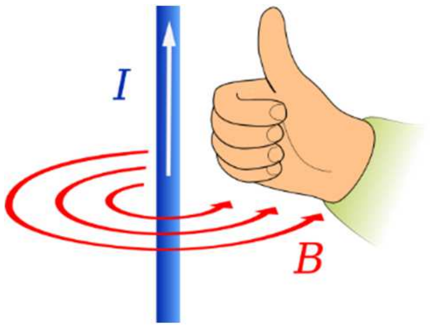
- Une ligne de champ est toujours ***orientée*** : cela indique le sens du champ $\vec{B}$.
- Le champ magnétique est ***tangent aux lignes de champ***.
- Le champ magnétique est d'autant ***plus intense*** que les ***lignes se rapprochent***.
- Le champ magnétique est nul à l'intersection de deux lignes de champ.
- Les lignes de champ magnétique sont forcément des courbes fermées.

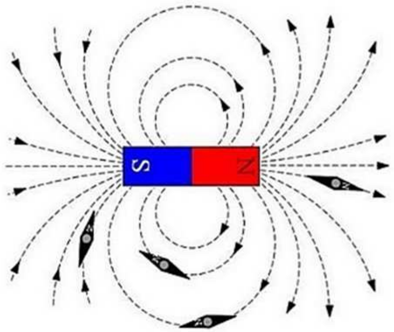


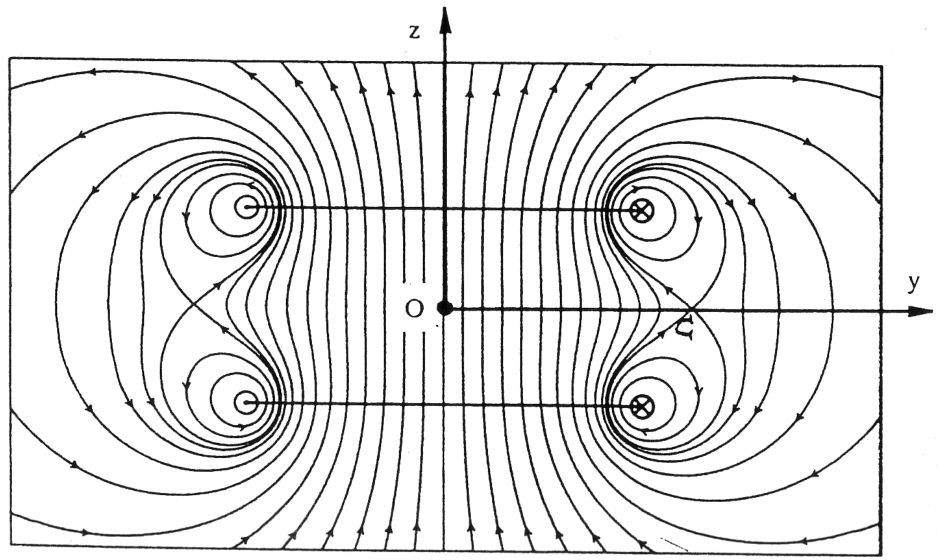
Savoir lire une carte de champ

Propriétés : Orientation des lignes de champ

- <u>Champ magnétique créé par un courant électrique</u> : Les lignes de champ magnétique ***sont des courbes fermées*** qui enlacent les fils parcourus par des courants. Les sens d'orientation du champ et de l'intensité sont reliés par la ***règle de la main droite*** (appelée aussi règle du tir-bouchon de Maxwell).
- <u>Champ magnétique créé par un ***aimant permanent***</u> : Les lignes de champ magnétique d'un aimant quittent le pôle nord de l'aimant et rentre par le pôle sud







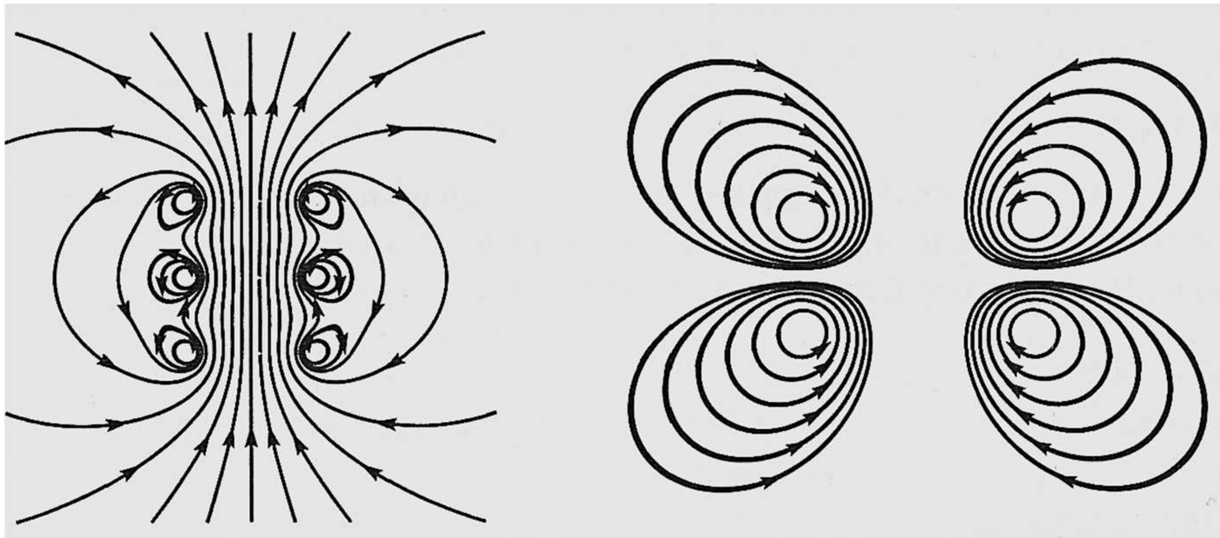
Savoir lire une carte de champ

Savoir-faire 1

On visualise les lignes de champ magnétique suivantes créées par des conducteurs filiformes.

Pour chaque cas, répondre aux questions suivantes :

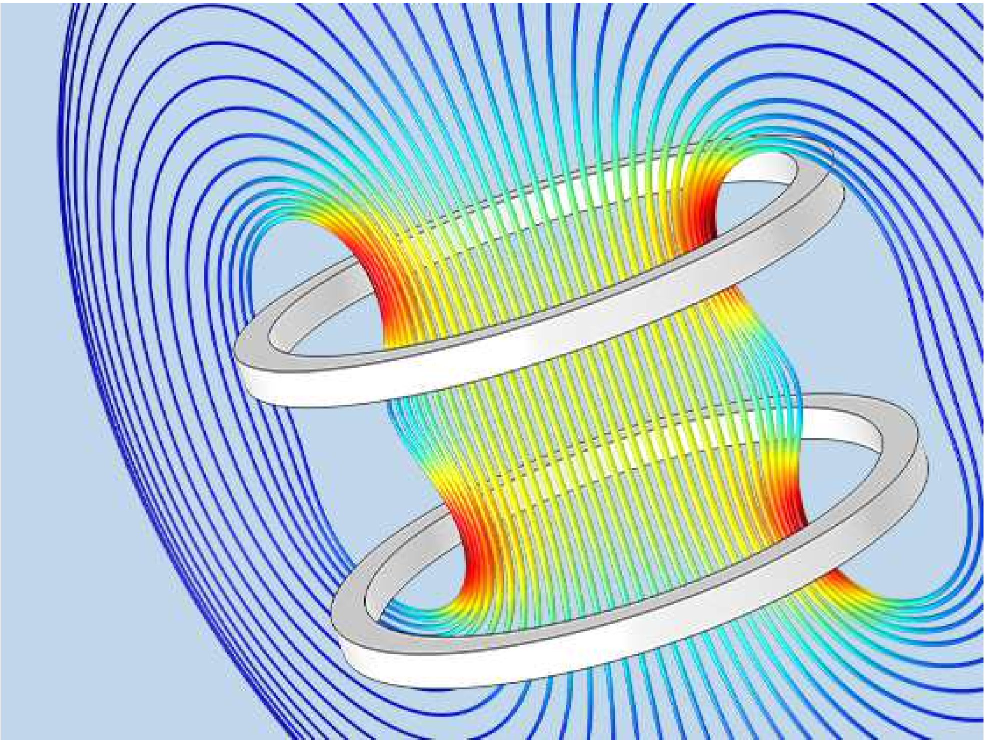
1. Où, sur une ligne de champ donnée, le champ est-il le plus intense ?
2. Indiquer les zones où le champ peut être considérer comme uniforme.
3. Où sont placées les sources ?
4. Le courant sort-il ou rentre-t-il de la figure ?



Il ne manque plus que l'intensité…

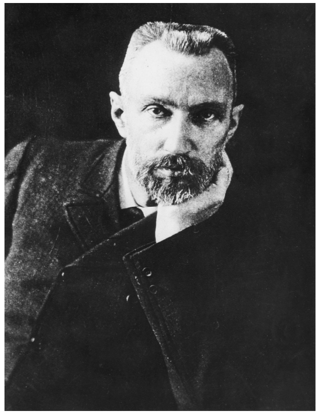
Exemple de source	**Ordre de grandeur de $\left\|\vec{B}\right\|$**
Champ magnétique terrestre	≈ 50 µT
Un magnet sur le frigo	≈ 1mT
Un “bon” aimant permanent	≈ 1 T
Un appareil d'IRM	≈ 5 T
L'aimant “permanent” le plus puissant	≈ 20 T

Vers une expression du champ magnétique: déterminer l'expression de $\vec{B}$ dans des cas simples



Dans les cas pas simples, merci la simulation numérique!

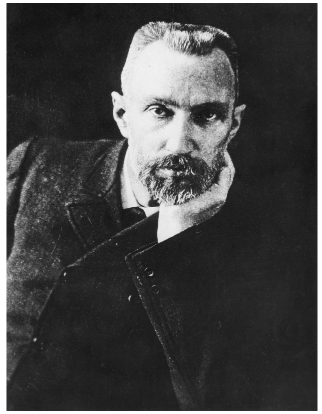
Vers une expression du champ magnétique: déterminer l'expression de $\vec{B}$ dans des cas simples



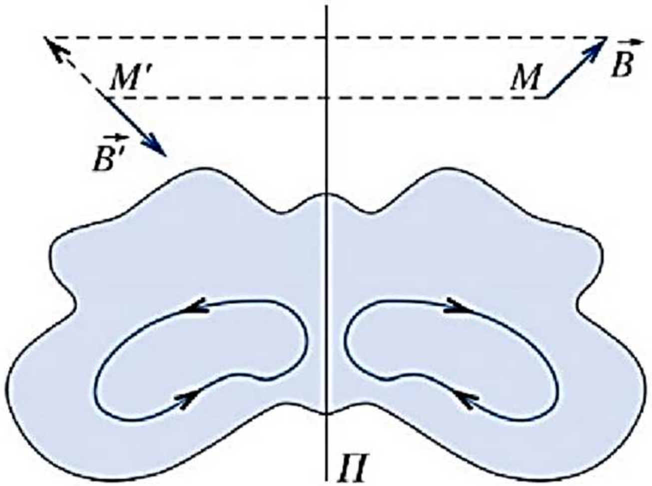
Principe : Principe de (Pierre) Curie

En physique, les conséquences doivent au moins avoir les symétries des causes qui leur ont donné naissance.

Vers une expression du champ magnétique: déterminer l'expression de $\vec{B}$ dans des cas simples

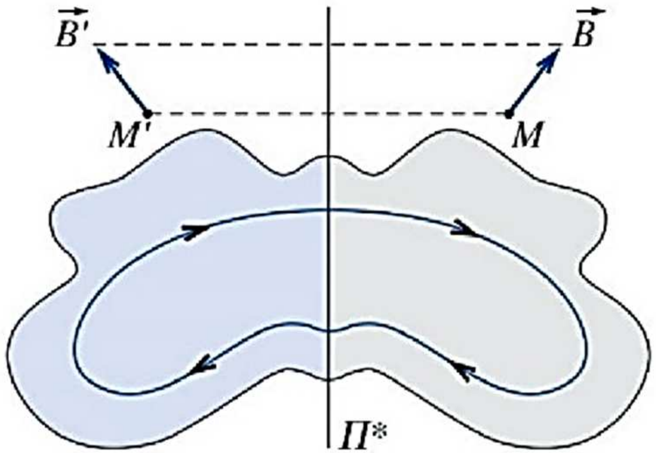


> **Principe : Principe de (Pierre) Curie**
>
> En physique, les conséquences doivent au moins avoir les symétries des causes qui leur ont donné naissance.



Champs en deux points symétriques.

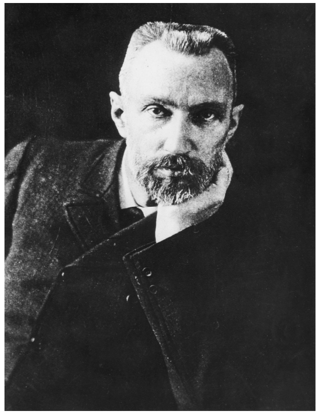
Distribution symétrique



Champs en deux points symétriques.

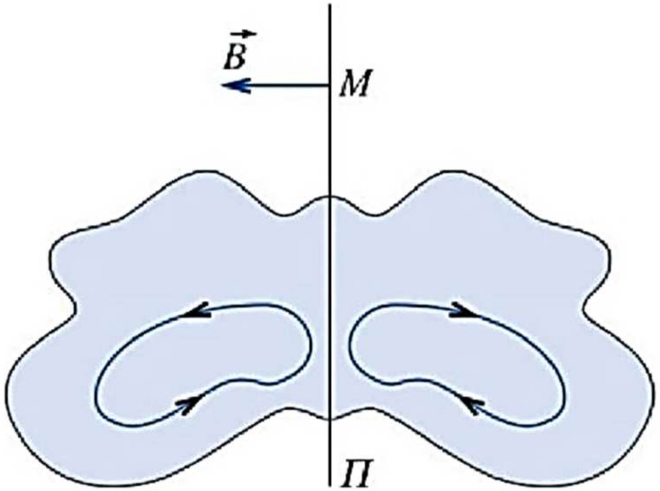
Distribution antisymétrique

Vers une expression du champ magnétique: déterminer l'expression de $\vec{B}$ dans des cas simples

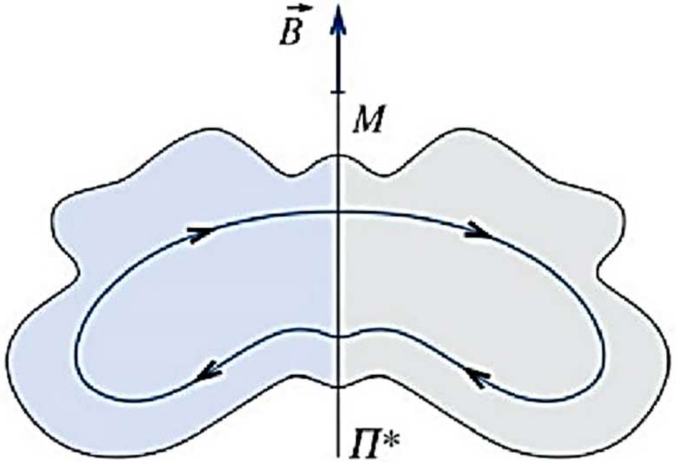


Principe : Principe de (Pierre) Curie

En physique, les conséquences doivent au moins avoir les symétries des causes qui leur ont donné naissance.

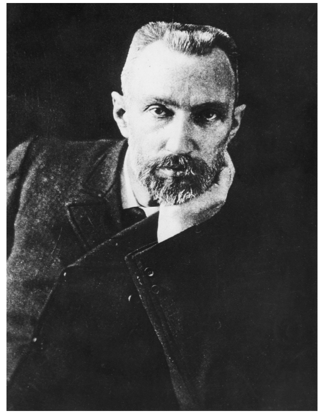


Champ magnétique sur un plan de symétrie.



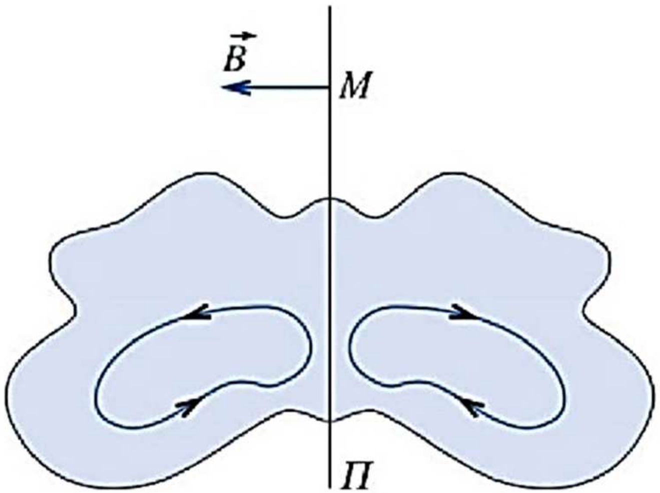
Champ sur un plan d'antisymétrie.

Vers une expression du champ magnétique: déterminer l’expression de $\vec{B}$ dans des cas simples

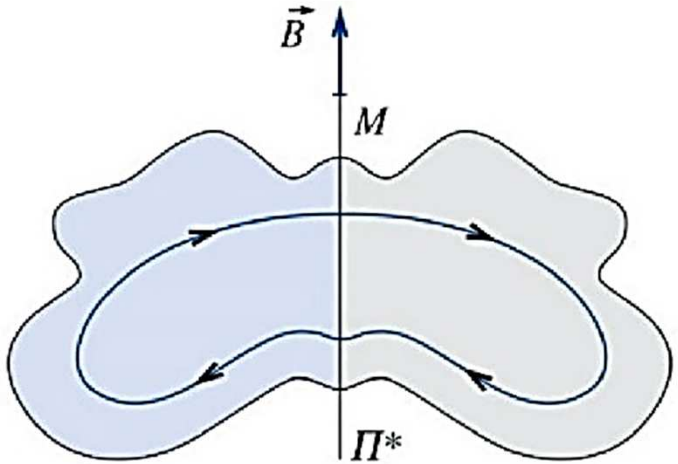


Principe : Principe de (Pierre) Curie

En physique, les conséquences doivent au moins avoir les symétries des causes qui leur ont donné naissance.



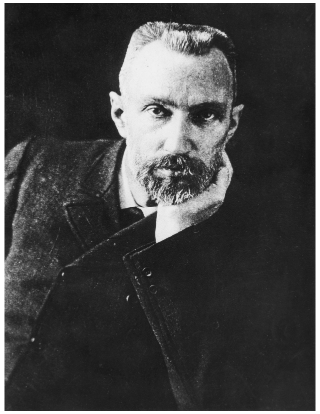
Champ magnétique sur un plan de symétrie.



Champ sur un plan d’antisymétrie.

On a accès à la direction de $\vec{B}$ sur ces plans !!!

Vers une expression du champ magnétique: déterminer l'expression de $\vec{B}$ dans des cas simples



Principe : Principe de (Pierre) Curie

En physique, les conséquences doivent au moins avoir les symétries des causes qui leur ont donné naissance.

Propriété : Invariances

La distribution de courant est dite ***invariante*** par une transformation si cette transformation laisse la distribution identique à elle-même.

- ***Invariance par translation*** : Si la distribution de courant est invariante par translation selon un axe, le champ l'est aussi : il ne dépend donc pas de la coordonnée le long de cet axe.
- ***Invariance par rotation*** : Si la distribution est invariante par rotation autour d'un axe, les composantes du champ le sont aussi : elles ne dépendent donc pas de la coordonnée angulaire qui définit la rotation autour de cet axe.

Vers une expression du champ magnétique: déterminer l'expression de $\vec{B}$ dans des cas simples

Méthode : Détermination de la forme d'un champ magnétique

- Compte-tenu de la forme globale de la situation physique, je choisis le ***système de coordonnées adapté*** :
  catérisien (plan privilégié) ; *cylindrique* (axe privilégié) ; *sphérique* (point privilégié).
- J'écris ***toutes les composantes du vecteur*** $\vec{B}(M)$.
  Exemple : $\vec{B}(M) = B_x(x,y,z).\vec{u_x} + B_y(x,y,z).\vec{u_y} + B_z(x,y,z).\vec{u_z}$
- Je cherche les ***plans de symétrie ou d'antisymétrie de la distribution de courant***, contenant le point M. Je raye alors les composantes nulles du champ $\vec{B}$
  Exemple : $\vec{B}(M) = B_x(x,y,z).\vec{u_x} + \underbrace{\cancel{B_y(x,y,z).\vec{u_y}}}_{M \in \Pi^* = \mathrm{Vec}\{\vec{u_x},\vec{u_z}\}} + \underbrace{\cancel{B_z(x,y,z).\vec{u_z}}}_{M \in \Pi^* = \mathrm{Vec}\{\vec{u_x},\vec{u_y}\}}$

  Remarque : trouver un plan de symétrie de la distribution de courant permet d'éliminer plus de composantes qu'un plan d'antisymétrie.
- Je cherche les ***invariances*** de la situation physique et raye les coordonnées correspondantes.
  Exemple : $\vec{B}(M) = \underbrace{B_x(\cancel{x},\cancel{y},z)}_{\substack{inv.par\ translation \\ selon\ \vec{u_x}\ et\ \vec{u_y}}} .\vec{u_x}$
- Je conclus sur la forme du champ magnétique.

Vers une expression du champ magnétique: déterminer l'expression de $\vec{B}$ dans des cas simples

Allure du champ $\vec{B}$ autour d'un fil infiniment long?
(1ère étape de SF2)

Vers une expression du champ magnétique: déterminer l'expression de $\vec{B}$ dans des cas si

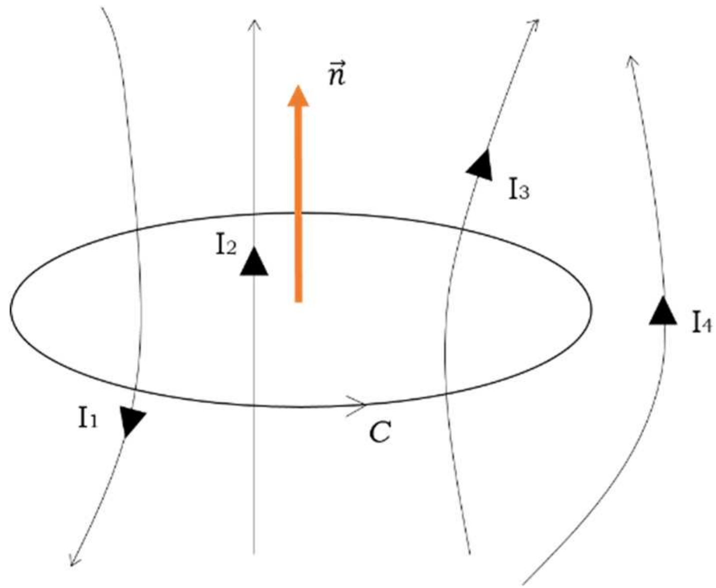
Théorème : Théorème d'Ampère (1820)

La **circulation du champ magnétique** $\vec{B}$ le long d'un contour $\mathcal{C}$ ***orienté*** et ***fermé***, que l'on appelle ***contour d'Ampère***, est égale à la ***somme algébrique des courants*** qui traversent la surface délimitée par $\mathcal{C}$:

$$\oint_{\mathcal{C}} \vec{B}.\overrightarrow{dl} = \mu_0 . I_{enlacés}$$

où $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$ T.m.A^{-1} est la perméabilité du vide.

Les courants enlacés par le contour fermé $\mathcal{C}$ sont comptés algébriquement ; cela signifie que le sens dans lequel ils traversent la surface délimitée par le contour $\mathcal{C}$ est important. Le contour C est orienté. Les courants respectant la règle de la main droite sont comptés positivement, ceux allant dans l'autre sens sont comptés négativement.



Vers une expression du champ magnétique: déterminer l'expression de $\vec{B}$ dans des cas simples

Méthode : Détermination du champ grâce au théorème d'Ampère

1. Schématiser la situation décrite dans l'énoncé.
2. Analyser les invariances des courants pour identifier les coordonnées dont dépend (ou ne dépend pas) $\vec{B}(M)$. Choisir alors le système de coordonnées adapté.
3. Analyser les symétries des courants pour connaître la direction de $\vec{B}(M)$ au niveau des plans de symétrie et d'antisymétrie.
4. Choisir un contour fermé $\mathcal{C}$ (« contour d'Ampère »), contenant M, le long duquel le calcul de la circulation de $\vec{B}$ est simple (en général $\vec{B} \parallel \overrightarrow{dl}$ ou $\vec{B} \perp \overrightarrow{dl}$). ***Choisir un sens*** de parcours du contour.
5. Calculer le courant total enlacé $I_{enlacés}$ par ce contour $\mathcal{C}$. Attention à l'orientation : le courant est compté positivement s'il respecte la règle de la main droite par rapport au sens de parcours du contour $\mathcal{C}$.
6. Appliquer le théorème d'Ampère $\oint_{\mathcal{C}} \vec{B}.\overrightarrow{dl} = \mu_0.I_{enlacés}$ et en déduire $\vec{B}(M)$.

Vers une expression du champ magnétique: déterminer l'expression de $\vec{B}$ dans des cas simples

Savoir-faire 2 – Savoir utiliser le théorème d'Ampère

On considère un fil rectiligne supposé infiniment long (cela revient à se placer à une distance r très petite devant sa longueur) parcouru par un courant d'intensité I.

Quel est le champ magnétique $\vec{B}$ créé par ce fil ?

Sources usuelles : Champ créé par un fil infini

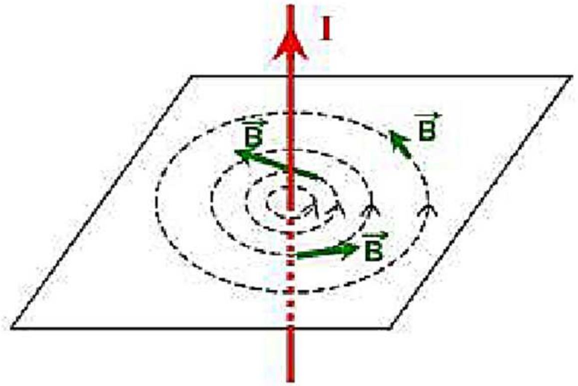
Propriété : Champ magnétique créé par un fil rectiligne infini

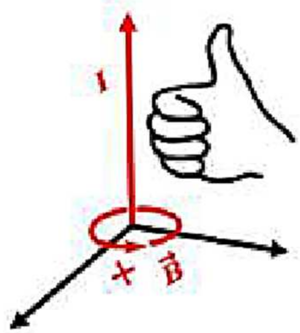
Le champ magnétique $\vec{B}$ créé par un courant I circulant dans un fil infini est orthoradial

$$\vec{B} = B_\theta(r).\overrightarrow{u_\theta} \quad \text{avec} \quad B_\theta(r) = \frac{\mu_0 . I}{2\pi . r}$$

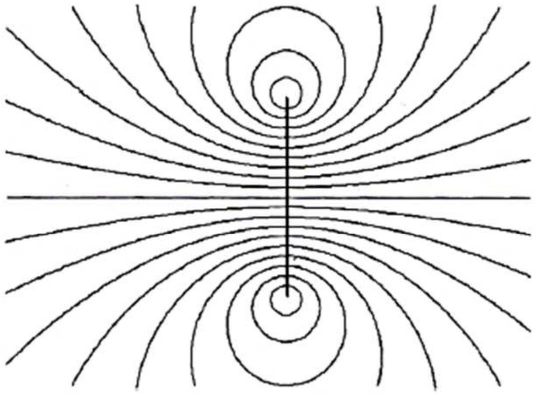
où $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$ T.m.A^{-1} est la perméabilité du vide.

Les lignes de champ sont des cercles centrés sur le fil. Elles sont orientées dans le sens direct.

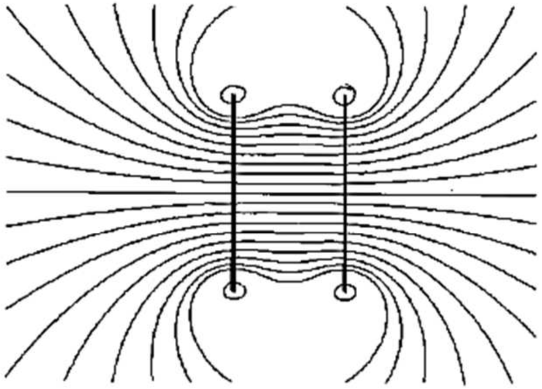




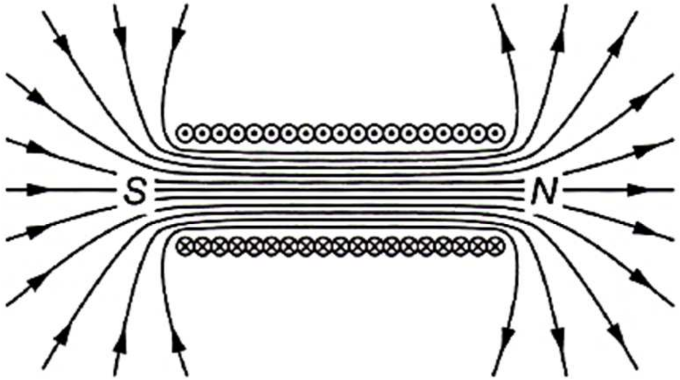
Sources usuelles : Spire(s) de courant



Spire unique



Deux spires

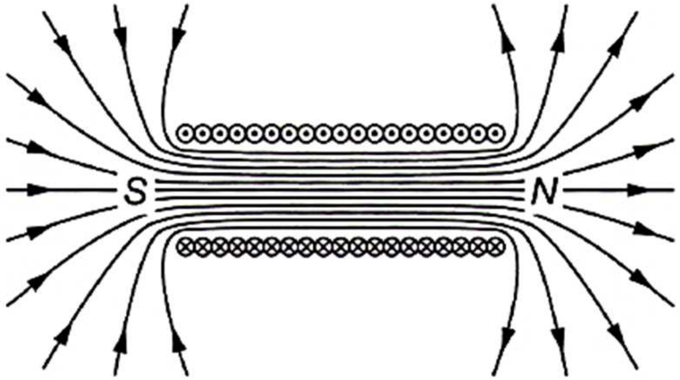


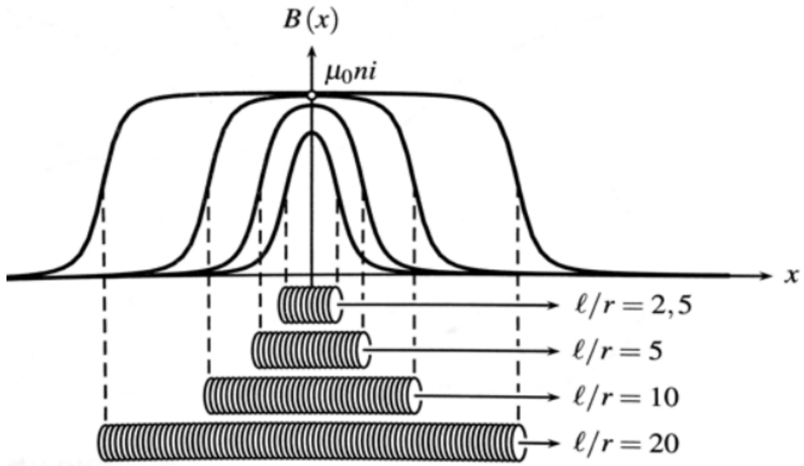
Solénoïde

Sources usuelles : Spire(s) de courant

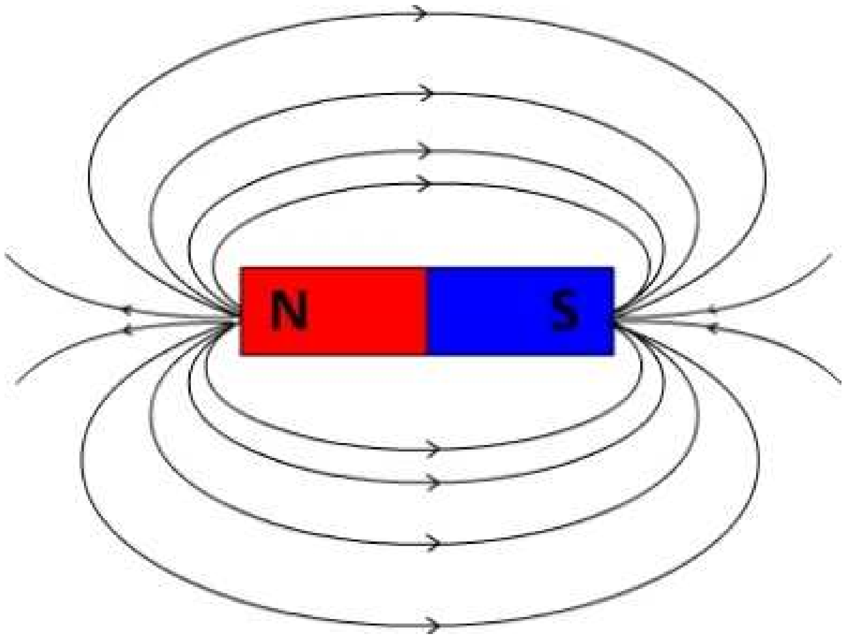
Modèle : Solénoïde infini (bobine longue)

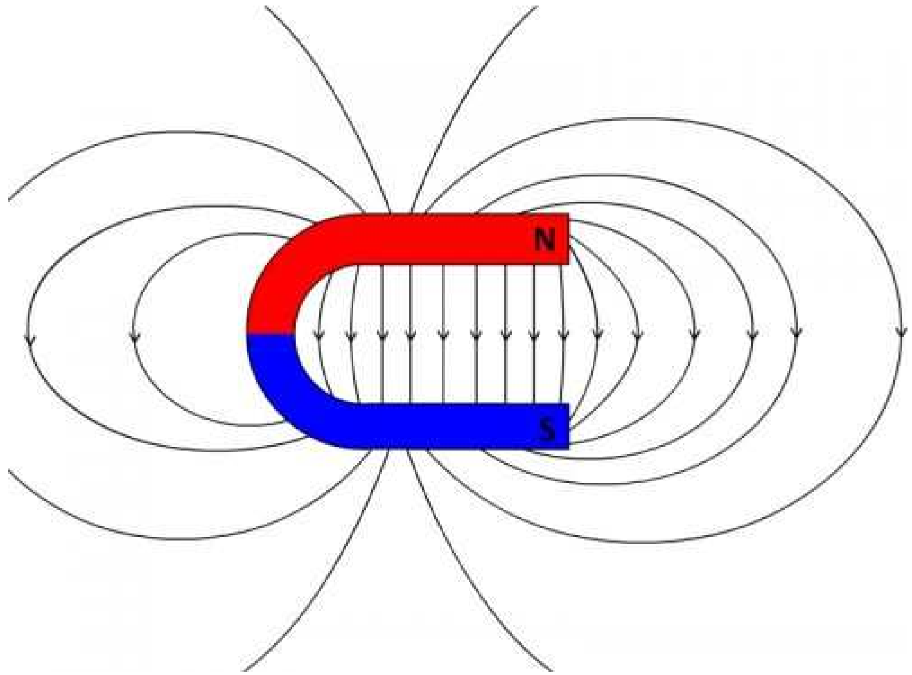
- Le rayon R du solénoïde est négligeable devant sa longueur ℓ.
- On note n la ***densité linéique de spire*** : c'est le nombre de spire par unité de longueur
$$n = N/\ell$$
- À l'intérieur d'un solénoïde infini, le champ est uniforme $\overrightarrow{B_{int}}(M) = \mu_0 . n . I . \overrightarrow{u_z}$.
- À l'extérieur d'un solénoïde infini, le champ est nul $\overrightarrow{B_{ext}} = \vec{0}$.



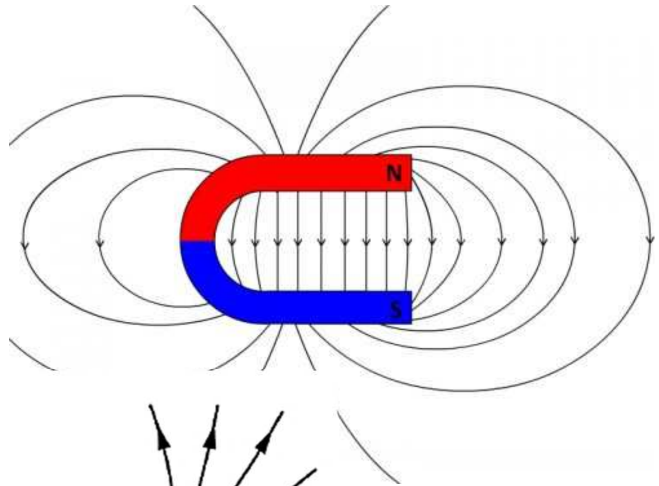


Sources usuelles : Aimant





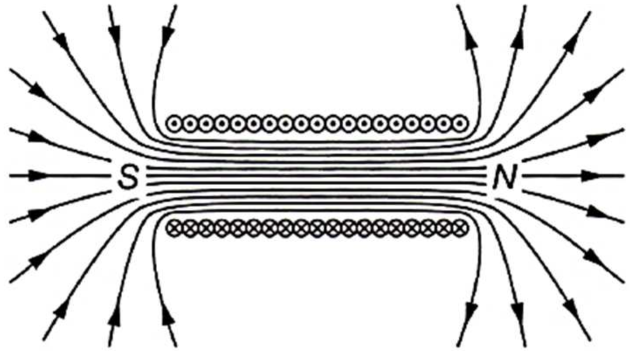
Champ magnétique uniforme



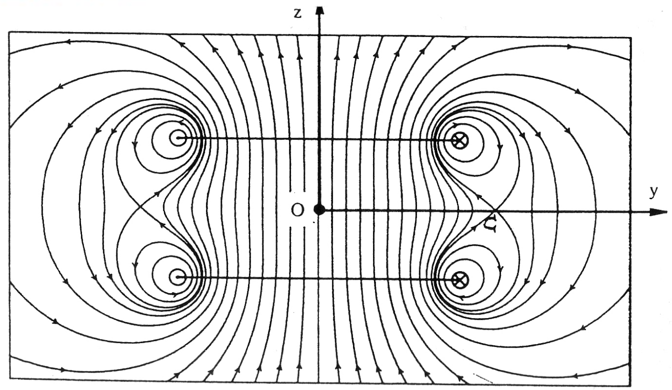
Propriétés : Production d'un champ magnétique uniforme

Les dispositifs suivants permettent de produire un ***champ magnétique uniforme*** :

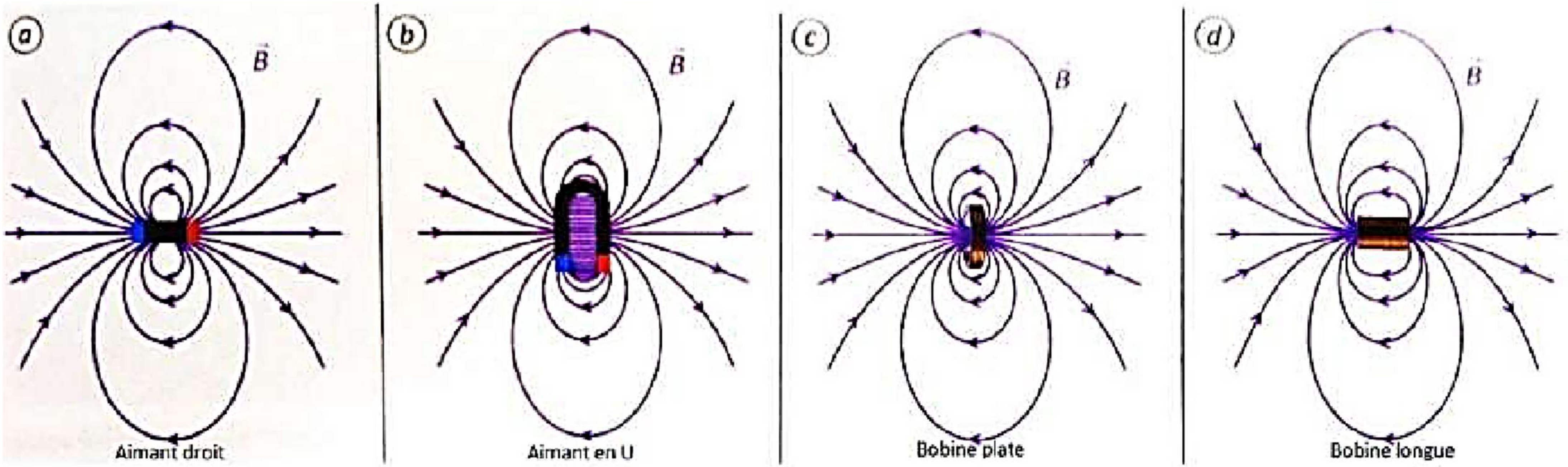
- ***Aimant en U*** : dans son entrefer ;
- ***Bobine longue*** (de longueur grande devant son rayon) : à l'intérieur, loin des bords ;
- ***Bobines de Helmoltz*** : entre deux bobines plates identiques parcourues par des courants identiques dans le même sens et séparées d'une distance égale au rayon.



Solénoïde



Modèle du dipôle magnétique



Vu de loin, c’est la même carte de champ!

Moment magnétique

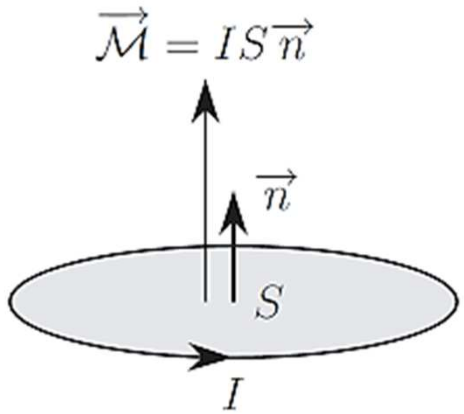
Définition : Moment magnétique d'une boucle de courant

Dans l'approximation dipolaire, une boucle plane de courant, de surface S, d'intensité I, est entièrement décrite par son ***moment magnétique dipolaire*** (en A.m^2) :

$$\vec{\mathcal{M}} = I.S.\vec{n}$$

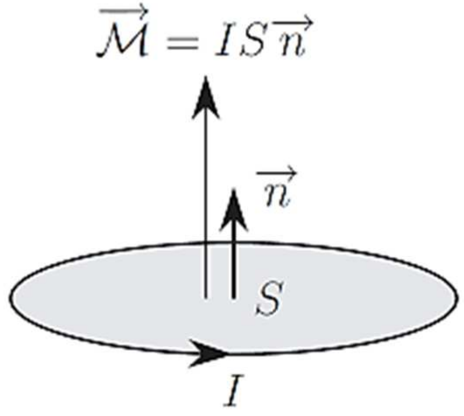
tel que le vecteur unitaire $\vec{n}$ soit orienté selon la règle de la main droite.

<u>Caractéristique du moment dipolaire d'une boucle de courant</u> :



- ***Direction*** : orthogonal au plan de la boucle ;
- ***Sens*** : suis la règle de la main droite :
  - si $I > 0$, $\vec{\mathcal{M}}$ est dans le même sens que $\vec{n}$;
  - si $I < 0$, $\vec{\mathcal{M}}$ est dans le sens opposé à $\vec{n}$;
- ***Norme*** : $\|\vec{\mathcal{M}}\| = |I|.S$ en A.m^2.

Moment magnétique



Propriété : Moment magnétique d'un aimant

Pour un aimant, la norme du moment magnétique $\|\overrightarrow{\mathcal{M}}\|$ dépend du matériau et de son volume. L'orientation de $\overrightarrow{\mathcal{M}}$ va du pôle sud vers le pôle nord.

Exemple de source	**Ordre de grandeur de $\|\overrightarrow{\mathcal{M}}\|$**
Aimant usuel	≈ 1 A.m^2
Terre	$\approx 1.10^{23}$ A.m^2