Le champ magnétique et ses actions

Plan du cours

1. Le champ magnétique

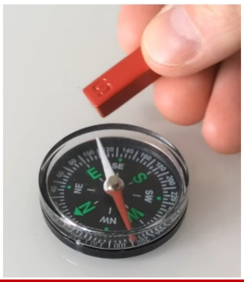
1.1. Rappel sur la notion de champ

Définition : Notion de champ en physique (rappels)

Un ***champ*** est associé à une propriété physique qui se manifeste ***en tout point de l'espace*** et ***à tout instant***. Cette propriété est définie par une ***grandeur physique*** qui est une fonction de l'espace et du temps.

- Un champ est ***scalaire*** quand la grandeur physique qui le représente est une fonction scalaire de l'espace et du temps.
  Exemples : température, pression, potentiel gravitationnel...
- Un champ est ***vectoriel*** quand la grandeur physique qui le représente est une fonction vectorielle de l'espace et du temps.
  Exemples : vitesse d'écoulement d'un fluide, champ de pesanteur, champ électrique, champ magnétique…
- Un champ est ***stationnaire*** lorsqu'il est indépendant du temps.
- Un champ est ***uniforme*** lorsqu'il est indépendant des coordonnées de l'espace. Il est identique en tout point.

1.2. Définition du champ magnétique



Un champ magnétique $\vec{B}$ est mis en évidence grâce à une aiguille aimantée : à la surface de la Terre en l'absence d'autre source de champ magnétique, l'aiguille s'aligne sur le champ magnétique terrestre. Si on approche un aimant de l'aiguille, celle-ci change de direction.

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).

Sources : Un champ magnétique peut avoir diverses origines :
un ***aimant permanent***, la ***Terre*** ou un ***courant électrique*** (expérience d'Œrsted en 1820).

Rmq : En réalité, toutes ces sources sont liées au même phénomène : des ***particules chargées en mouvement***.

Définition plus fondamentale : Champ magnétique

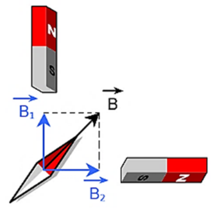
Le ***champ magnétique*** $\vec{B}$ est défini par la composante magnétique de la ***force de Lorentz*** $\vec{F_L}$ qu'il exerce sur une particule chargée de charge q et animée d'une vitesse $\vec{v}$ dans le référentiel du champ :

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

Propriétés : Principe de superposition

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

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

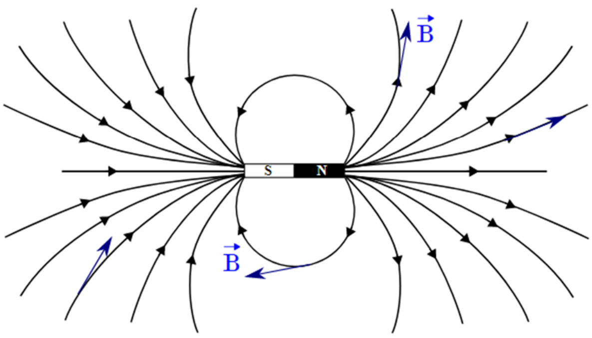


1.3. Représentation du champ magnétique

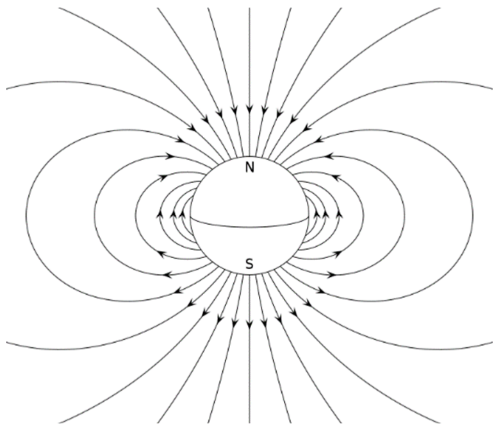
Définition : Lignes et cartes de champ

- 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***.
- La visualisation globale du champ vectoriel, sur laquelle sont tracées plusieurs lignes de champ, est alors appelée ***carte de champ***. Il y a perte d'informations dans cette représentation car la valeur de $\|\vec{B}\|$ n'est pas connue, mais on pourra quand même connaître l'évolution de sa valeur.

Exemples de cartes de champs :



Aimant droit



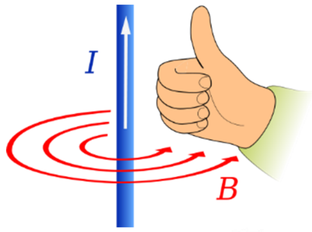
Terre

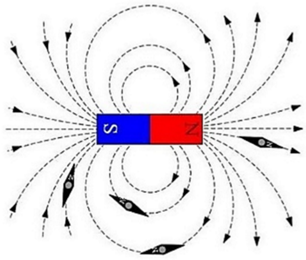
Méthode : Savoir lire une carte de champ

- 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.

1.4. Forme du champ du champ magnétique

1.4.1. Orientation des lignes de champ





Propriétés : Orientation des lignes de champ

- Champ magnétique créé par un courant électrique : 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).
- Champ magnétique créé par un ***aimant permanent*** : Les lignes de champ magnétique d'un aimant quittent le pôle nord de l'aimant et rentre par le pôle sud

1.4.2. Symétries et invariances

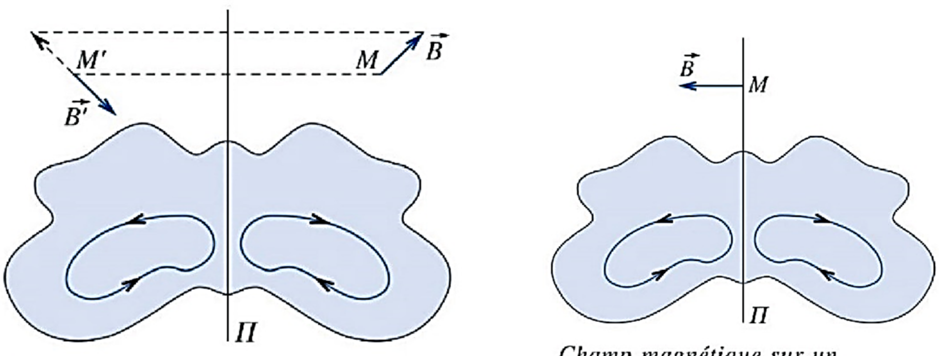
Principe : Principe de (Pierre) Curie

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

Le champ magnétique B est défini par la force subie par une particule chargée en mouvement. Cette force est la véritable conséquence qui doit être considérée dans l'application du principe de Curie. Cette force fait intervenir un produit vectoriel dont le sens dépend de l'orientation de l'espace. Le champ magnétique aura donc des propriétés de symétrie différentes suivant que l'on considère des transformations qui inversent l'orientation (symétrie plane) ou non (translation, rotation).

Propriété : Symétrie de la distribution de courant → Antisymétrie du champ magnétique

Soit un plan Π, plan de symétrie de la distribution de courant. Au point M' symétrique d'un point M par rapport au plan Π, le champ $\vec{B}(M')$ est l'opposé du symétrique du champ $\vec{B}(M)$ au point M.



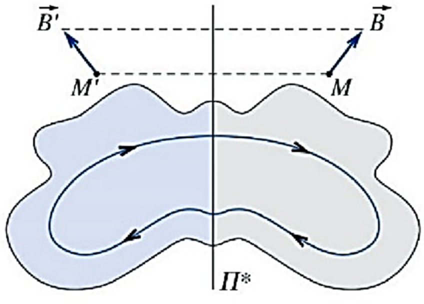
Champs en deux points symétriques. *Champ magnétique sur un plan de symétrie.*

En bref, un plan de symétrie de la distribution de courant est un plan d'antisymétrique du champ magnétique.

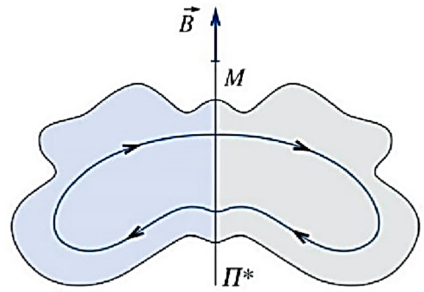
Conséquence : Le champ magnétique $\vec{B}$ en un point quelconque du plan Π de symétrie de la distribution de courant est perpendiculaire à ce plan.

Propriété : Antisymétrie de la distribution de courant → Symétrie du champ magnétique

Soit un plan Π^*, plan d'antisymétrie de la distribution de courant. Au point M' symétrique d'un point M par rapport au plan Π^*, le champ $\vec{B}(M')$ est le symétrique du champ $\vec{B}(M)$ au point M.



Champs en deux points symétriques.



Champ sur un plan d'antisymétrie.

En bref, un plan d'antisymétrie de la distribution de courant est un plan de symétrique du champ magnétique.

Conséquence : Le champ magnétique $\vec{B}$ en un point quelconque du plan Π^* d'antisymétrie de la distribution de courant est contenu dans ce plan.

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.

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 : $\vec{B}(M) = B_x(x,y,z).\overrightarrow{u_x} + B_y(x,y,z).\overrightarrow{u_y} + B_z(x,y,z).\overrightarrow{u_z}$
- 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 : $\vec{B}(M) = B_x(x,y,z).\overrightarrow{u_x} + \underbrace{\cancel{B_y(x,y,z).\overrightarrow{u_y}}}_{M\in\Pi^*=\mathrm{Vec}\{\overrightarrow{u_x},\overrightarrow{u_z}\}} + \underbrace{\cancel{B_z(x,y,z).\overrightarrow{u_z}}}_{M\in\Pi^*=\mathrm{Vec}\{\overrightarrow{u_x},\overrightarrow{u_y}\}}$

  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 : $\vec{B}(M) = \underbrace{\cancel{B_x}(\cancel{x},\cancel{y},z)}_{\substack{inv.par\ translation\\ selon\ \overrightarrow{u_x}\ et\ \overrightarrow{u_y}}}.\overrightarrow{u_x}$
- Je conclus sur la forme du champ magnétique.

1.5. Intensité du champ magnétique

1.5.1. Ordre de grandeur

Ordre de grandeur de quelques champ magnétique à avoir en tête

Exemple de source	Ordre de grandeur de $\|\vec{B}\|$
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

➔ *Moralité : un champ de 1 tesla est un champ important.*

1.5.2. **Théorème d’Ampère** (programme de 2ème année)

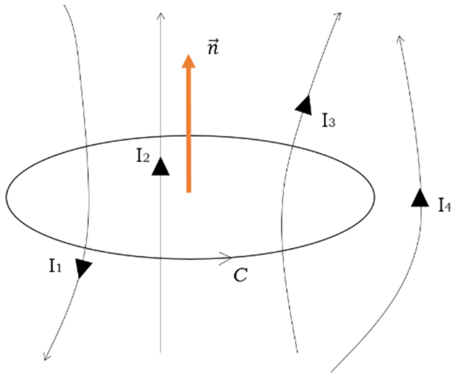
Théorème : Théorème d’Ampère

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 $\mathcal{C}$:

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

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.



En pratique, pour pouvoir être exploité efficacement, le théorème d’Ampère nécessite que le problème envisagé soit de ***symétrie élevée***.

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 $\vec{B} \parallel \vec{dl}$ ou $\vec{B} \perp \vec{dl}$). ***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 $\oint_{\mathcal{C}} \vec{B}.\vec{dl} = \mu_0.I_{enlacés}$ et en déduire $\vec{B}(M)$.

2. Champ créé par des sources usuelles

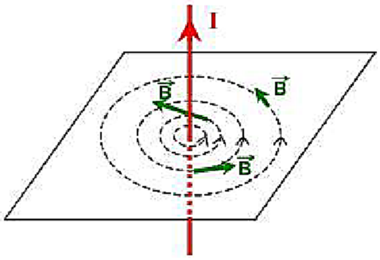
2.1. Champ créé par un fil infini

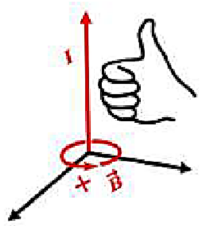
Propriété : **Champ magnétique créé par un fil rectiligne infini**

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.

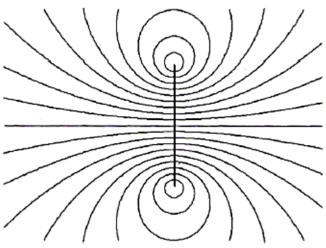




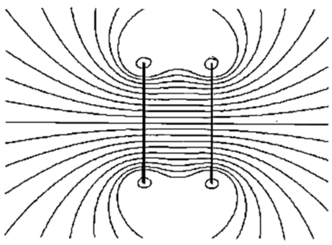
2.2. Champ créé par une ou plusieurs spires de courant

On appelle ***spire de courant*** un circuit électrique fermé parcouru par un courant électrique. Le circuit le plus simple étant un cercle (aussi appelé boucle) pour lequel le mouvement d'ensemble des électrons est circulaire.
En pratique, une telle spire peut être obtenue avec un fil électrique en forme de cercle alimenté par une pile électrique. Un ensemble de spires de courant disposées côte à côte constitue une bobine électrique ou solénoïde.

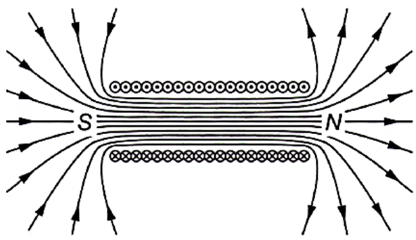
Le champ magnétique créé par chacune des spires de courant s'additionne. L'association de multiples spires permet de construire une zone de champ magnétique uniforme :



Spire unique



Deux spires



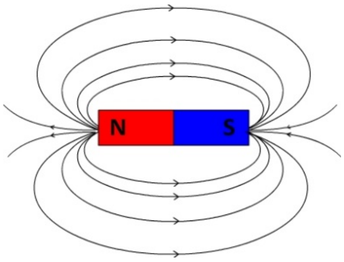
Solénoïde

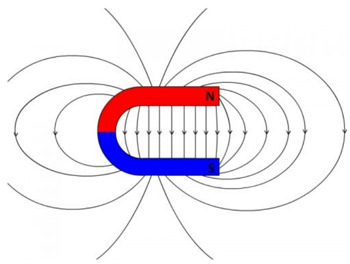
Modèle : **Solénoïde infini (bobine longue)**

- 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 $\overrightarrow{B_{ext}} = \vec{0}$.

2.3. Champ créé par un aimant

Aimant droit





Aimant en U

2.4. Champ magnétique uniforme

Propriétés : Production d'un champ magnétique uniforme

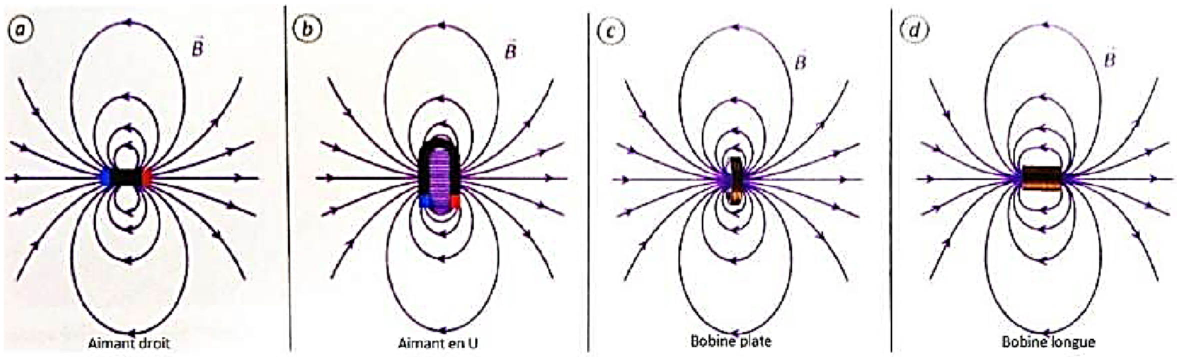
Les dispositifs suivants permettent de produire un ***champ magnétique uniforme*** :
- ***Aimant en U*** : dans son entrefer ;
- ***Bobine longue*** (de longueur grande devant son rayon) : à l'intérieur, loin des bords ;
- ***Bobines de Helmoltz*** : entre deux bobines plates identiques parcourues par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

3. Moment magnétique

3.1. Modèle du dipôle magnétique

Modélisation : Modèle du dipôle magnétique

À une ***distance d'observation grande devant leurs dimensions***, les aimants, bobine, boucle de courant, possède la même carte de champs, celle du ***dipôle magnétique***.



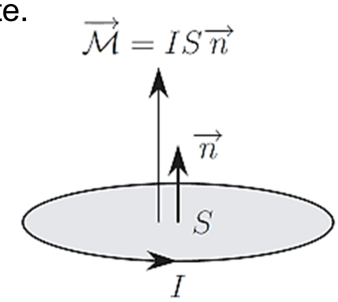
3.2. Moment magnétique

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.



Caractéristique du moment dipolaire d'une boucle de courant :
- ***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.

Remarque : le moment magnétique d'une bobine plate comportant N spire identique parcourue le même courant I vaut $\vec{\mathcal{M}} = N.I.S.\vec{n}$.

Propriété : Moment magnétique d'un aimant

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

Ordre de grandeur de moment magnétique à avoir en tête

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

4. Actions d'un champ magnétique

4.1. Force de Laplace

Définition : Force de Lorentz (Rappel)

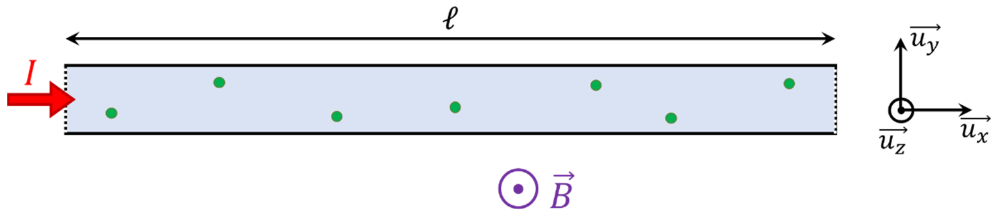
En présence d'un champ électrique $\vec{E}$ et d'un champ magnétique $\vec{B}$, une particule de charge q se déplaçant à la vitesse $\vec{v}$ subit une force qui vaut :

$$\boxed{\overrightarrow{F_L} = q.\left(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}\right)}$$

Cette force est nommée ***force de Lorentz***.

Définition : Force de Laplace

La force de Laplace est la résultante (somme) des forces de Lorentz qui s'appliquent sur les électrons mobiles (porteurs de charge) présents dans une tige mobile.



Démonstration : De la force de Lorentz à la force de Laplace

Nous faisons l'hypothèse que tous les électrons se déplacent à la même vitesse v.

- Le temps Δt nécessaire à un électron, de vitesse v, pour parcourir le rail, de longueur ℓ est :
$$\boldsymbol{\Delta t = \ell / v}$$
- Durant Δt, un nombre N d'électrons, initialement contenu dans le rail, en sortira. On peut lier le courant I circulant dans le rail au mouvement de ces porteurs de charge :
$$\boldsymbol{I = -N.e/\Delta t}$$
- D'où la relation liant le courant, le nombre d'électrons N dans le rail et la vitesse v :
$$\boldsymbol{I = -N.e.v/\ell}$$
- La norme de la force de Lorentz appliquée à chacun des électrons, dans le cas d'une tige mobile perpendiculaire au champ $\vec{B}$ est alors :
$$\boldsymbol{F_L = -e.v.B}$$
- La force de Laplace est enfin la somme des forces de Lorentz, soit :
$$\boldsymbol{F_{Laplace} = -N.e.v.B = I.\ell.B}$$

Définition : Expression de la force de Laplace élémentaire

La force élémentaire $\overrightarrow{dF}$ s'appliquant à une portion élémentaire orientée $\overrightarrow{d\ell}$ de circuit filiforme, parcouru par un courant i et plongé dans un champ magnétique $\vec{B}$ est appelé ***force de Laplace***, et s'exprime par :

$$d\vec{F} = i.\overrightarrow{d\ell} \wedge \vec{B}$$

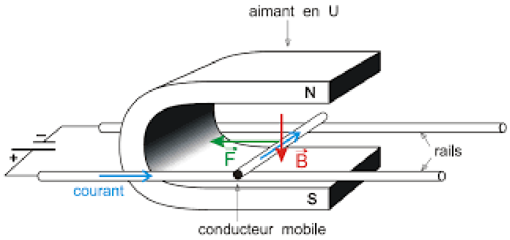
Remarques :

- Le vecteur $\overrightarrow{d\ell}$ est tangent au fil, et son sens d'orientation est celui du courant et donc de l'orientation choisi pour le circuit.

Propriété : Résultante des forces de Laplace sur un rail plongé dans un champ $\vec{B}$ uniforme

Pour un rail rectiligne de longueur ℓ, plongé dans un champ uniforme $\vec{B} = B.\overrightarrow{u_z}$ et parcouru par un courant i dans la direction $\overrightarrow{u_x}$ (« rail de Laplace »), on retrouve :

$$\vec{\boldsymbol{F}}_{\boldsymbol{Laplace}} = \int_0^\ell d\vec{F} = \int_0^\ell i.\overrightarrow{d\ell} \wedge \vec{B} = -i.\ell.B.\overrightarrow{u_y}$$

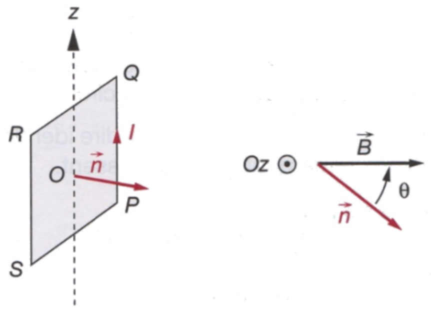


4.2. Rotation d'une spire rectangulaire dans un champ magnétique uniforme

Propriété : Résultante des forces de Laplace sur un circuit fermé placé dans un champ $\vec{B}$ uniforme

Dans un champ magnétique uniforme, la résultante des forces de Laplace appliquée à un ***circuit fermé*** est nulle.

$$\oint_{\substack{\text{circuit}\\ \text{fermé}}} i.\overrightarrow{d\ell} \wedge \vec{B} = \vec{0}$$

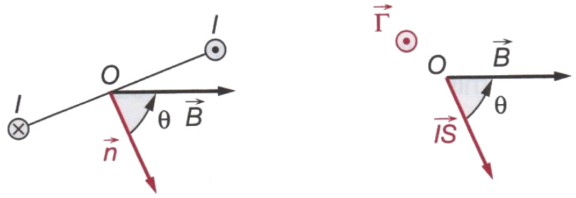


Définition : Couple de Laplace

Un cadre portant N spires parcourues par un courant I et plongé dans un champ magnétique $\overrightarrow{B_{ext}}$ uniforme orthogonal à l'axe de symétrie Δ du cadre, subit un couple de Laplace de moment :

$$\vec{\Gamma} = N.I.S.\vec{n} \wedge \overrightarrow{B_{ext}} = \vec{\mathcal{M}} \wedge \overrightarrow{B_{ext}}$$

où le vecteur $\vec{\mathcal{M}} = N.I.S.\vec{n}$ est appelé ***moment magnétique*** de la spire.



La puissance du couple de Laplace lors de la rotation du cadre autour de son axe de symétrie, à la vitesse angulaire $\vec{\Omega} = \omega.\overrightarrow{u_\Delta}$ vaut : $P_{\mathcal{L}} = (\vec{\mathcal{M}} \wedge \overrightarrow{B_{ext}}).\vec{\Omega}$

4.3. Action d'un champ $\vec{B}$ extérieur uniforme sur un aimant

Propriétés : Action d'un champ magnétique uniforme sur un dipôle

Soit un dipôle de moment magnétique $\vec{\mathcal{M}}$ plongé dans un champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire $\overrightarrow{B_{ext}}$.

- La résultante des actions magnétiques appliquées au dipôle est nulle $\vec{F} = \vec{0}$.
- Le moment des forces (le couple puisque $\vec{F} = \vec{0}$) s'exprime en fonction du moment dipolaire magnétique $\vec{\mathcal{M}}$ par

$$\vec{\Gamma} = \vec{\mathcal{M}} \wedge \overrightarrow{B_{ext}}$$

Définition : Énergie potentielle d'interaction entre un dipôle magnétique et un champ magnétique extérieur

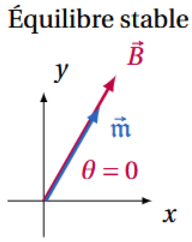
Il existe une ***énergie potentielle d'interaction*** entre un dipôle magnétique de moment dipolaire $\vec{\mathcal{M}}$ et un champ magnétique permanent $\overrightarrow{B_{ext}}$

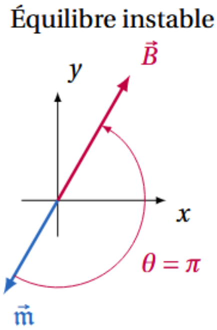
$$E_p = -\vec{\mathcal{M}}.\overrightarrow{B_{ext}}$$

Rappels : Une position est une position d'équilibre si $\frac{dE_p}{d\theta} = 0$. Cette position est stable si $\left(\frac{d^2E_p}{d\theta^2}\right)_{\theta_{éq}} > 0$.

Propriété : Stabilité d'un dipôle magnétique

La ***position d'équilibre stable*** d'un dipôle magnétique placé dans un champ magnétique uniforme correspond à un ***alignement*** du moment dipolaire sur le champ.





AU PROGRAMME

Notions et contenus	Capacités exigibles	Dans les exercices
Champ magnétique		
Sources de champ magnétique ; cartes de champ magnétique.	▪ Exploiter une représentation graphique d'un champ vectoriel, identifier les zones de champ uniforme, de champ faible et l'emplacement des sources. ▪ Tracer l'allure des cartes de champs magnétiques pour un aimant droit, une spire circulaire et une bobine longue. ▪ Décrire un dispositif permettant de réaliser un champ magnétique quasi uniforme. ▪ Citer des ordres de grandeur de champs magnétiques : au voisinage d'aimants, dans un appareil d'IRM, dans le cas du champ magnétique terrestre.	
Symétries et invariances des distributions de courant.	▪ Exploiter les propriétés de symétrie et d'invariance des sources pour prévoir des propriétés du champ créé.	
Lien entre le champ magnétique et l'intensité du courant.	▪ Évaluer l'ordre de grandeur d'un champ magnétique à partir d'expressions fournies.	
Moment magnétique.	▪ Définir le moment magnétique associé à une boucle de courant plane. ▪ Associer à un aimant un moment magnétique par analogie avec une boucle de courant. ▪ Citer un ordre de grandeur du moment magnétique associé à un aimant usuel.	
Actions d'un champ magnétique		
Densité linéique de la force de Laplace dans le cas d'un élément de courant filiforme.	▪ Différencier le champ magnétique extérieur subi du champ magnétique propre créé par le courant filiforme.	
Résultante et puissance des forces de Laplace.	▪ Établir et citer l'expression de la résultante des forces de Laplace dans le cas d'une barre conductrice placée dans un champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire. ▪ Exprimer la puissance des forces de Laplace.	
Couple et puissance des actions mécaniques de Laplace dans le cas d'une spire rectangulaire, parcourue par un courant, en rotation autour d'un axe de symétrie de la spire passant par les deux milieux de côtés opposés et placée dans un champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire orthogonal à l'axe.	▪ Établir et exploiter l'expression du moment du couple subi en fonction du champ magnétique extérieur et du moment magnétique. ▪ Exprimer la puissance des actions mécaniques de Laplace.	
Action d'un champ magnétique extérieur uniforme sur un aimant. Positions d'équilibre et stabilité.	▪ ***Mettre en œuvre un dispositif expérimental pour étudier l'action d'un champ magnétique uniforme sur une boussole.***	
Effet moteur d'un champ magnétique tournant.	▪ ***Créer un champ magnétique tournant à l'aide de deux ou trois bobines et mettre en rotation une aiguille aimantée.***	