

Chapitre I1 – Champ magnétique

Plan du cours

I Champ magnétique

I.1 Représentation graphique d'un champ magnétique

I.2 Sources de champ magnétique

I.3 Obtention d'un champ uniforme

II Moment magnétique

II.1 Moment magnétique d'une boucle de courant

II.2 Moment magnétique d'un aimant

III Action d'un champ magnétique

III.1 Force de Laplace

III.2 Couple magnétique

III.3 Action d'un champ magnétique sur un aimant

Ce qu'il faut savoir et savoir faire

- 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.
- Évaluer l'ordre de grandeur d'un champ magnétique à partir d'expressions fournies.
- 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.
- Différencier le champ magnétique extérieur subi du champ magnétique propre créé par le courant filiforme.
- Établir et exploiter l'expression de la résultante et de la puissance 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.
- 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.

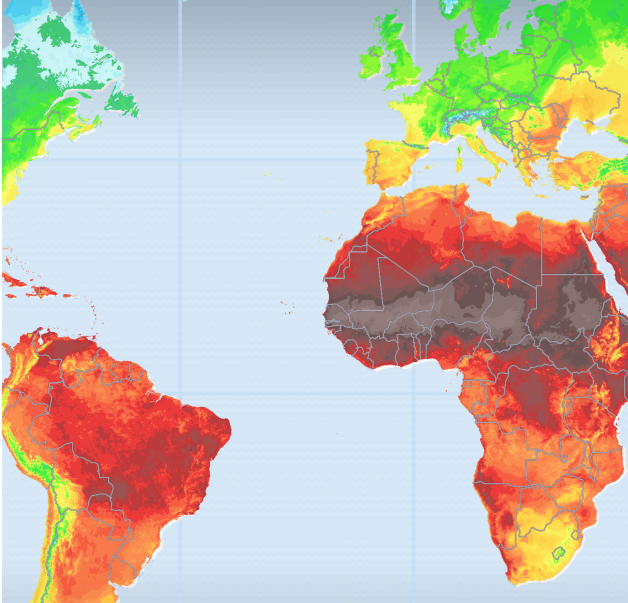
Questions de cours

- Représenter les lignes de champ au voisinage d'une spire, d'une bobine longue, d'un aimant.
- Expliquer comment s'identifie une zone de champ uniforme sur une carte de champ magnétique et décrire un dispositif permettant de réaliser un tel champ.
- En s'appuyant sur un schéma, donner l'expression de la force de Laplace qui s'exerce sur un élément de fil conducteur de longueur $d\ell$.
- Établir les expressions de la résultante et de la puissance des force de Laplace pour une barre conductrice dans un champ magnétique uniforme (App. 4).
- Établir l'expression du moment du couple subi par une spire rectangulaire (App. 5).

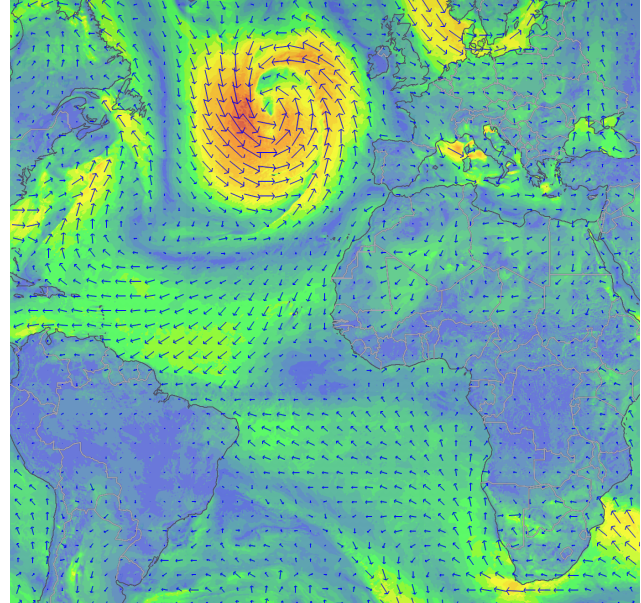
Documents

Document 1 – Représentation d'un champ

Température



Vents



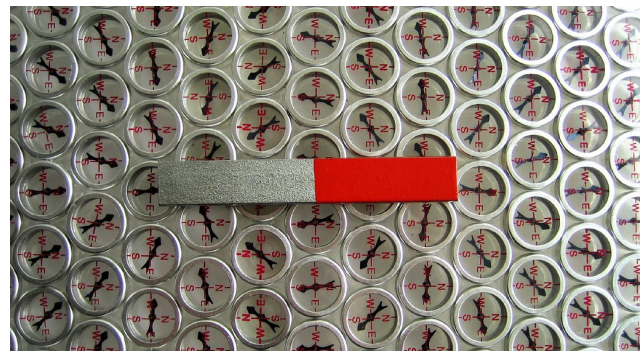
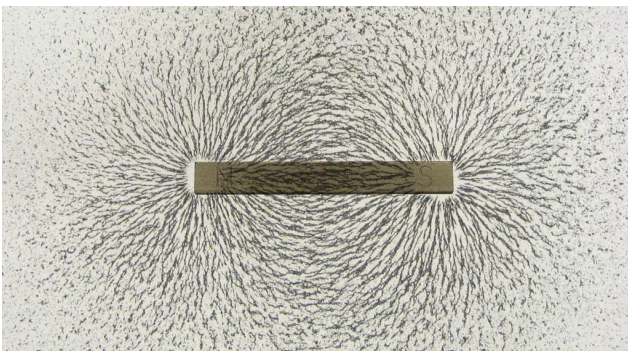
Pour représenter graphiquement un **champ scalaire** comme celui associé à la température, une simple échelle de couleur suffit.

Pour représenter un **champ de vecteur** comme celui associé à la vitesse du vent, la norme ne suffit pas : il faut aussi indiquer sa direction et son sens. On a alors souvent recours au tracé des **lignes de champ**.

earth.nullschool.net

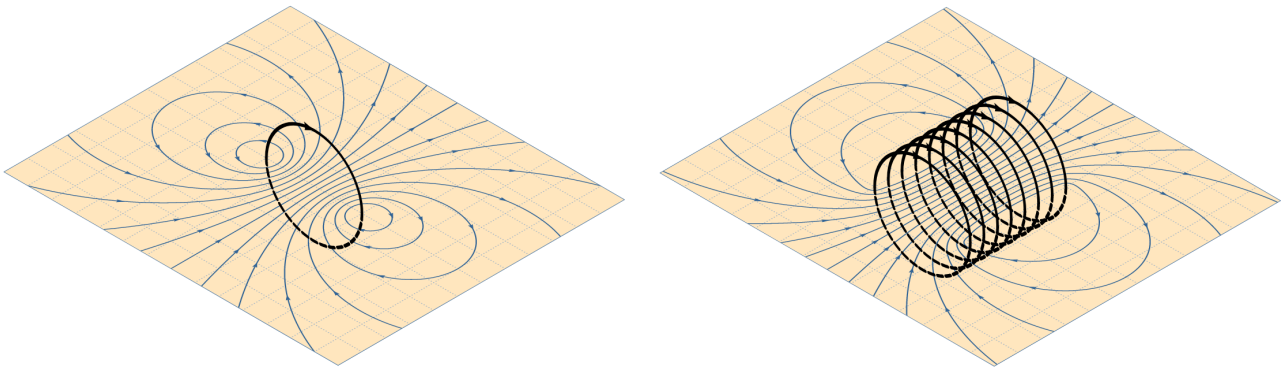
Document 2 – Mise en évidence d'un champ magnétique

Il est possible de mettre en évidence les lignes de champ magnétique à l'aide de limaille de fer ou d'un réseau de boussoles. En effet, les particules ferromagnétiques et les aiguilles des boussoles tendent à s'aligner avec le champ magnétique.



<https://youtu.be/9XvryuieFCQ> et sciences.univ-nantes.fr

Document 3 – Champ magnétique créé par une ou plusieurs spires de courant



Document 4 – IRM

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) repose sur l'utilisation de champs magnétiques intenses (jusqu'à quelques teslas). Un champ magnétique élevé permet d'obtenir des images de très grande précision. Plusieurs dispositifs permettent de produire les champs nécessaires au fonctionnement de l'appareil. Le plus intense doit être constant et uniforme sur un volume suffisant pour obtenir des images de bonne qualité

Il existe actuellement deux catégories d'appareils : les imageurs fermés (à gauche) et les imageurs ouverts (à droite). Ces derniers ont été développés pour faciliter l'accès aux patients lourdement médicalisés, souffrant d'obésité ou de claustrophobie, ou encore aux enfants en bas âge.

La résonance magnétique nucléaire (RMN) exploitée dans l'IRM, est par ailleurs utilisée pour analyser la matière : elle permet d'obtenir des informations sur la structure des molécules et des matériaux.



Document 5 – Les classiques du Palais de la découverte

La chaîne YouTube du [Palais de la découverte](https://www.youtube.com/channel/UC8vLNDuQ) rassemble les enregistrements des conférences données dans ce lieu incontournable, sur une grande variété de thèmes. À découvrir ou redécouvrir sans tarder !

<https://youtu.be/edprVzINDuQ>

1 Champ magnétique

L'action d'un champ magnétique \vec{B} sur des particules chargées est décrite par la composante magnétique de la force de Lorentz, introduite au Chap. M4 :

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

Dans ce chapitre, on s'intéresse d'une part aux sources de champ magnétique et d'autres part aux effets d'un champ magnétique à l'échelle macroscopique.

1.1 Représentation graphique d'un champ magnétique

Un **champ** est une grandeur physique qui dépend de l'espace et du temps. On parle de :

- champ **scalaire** pour une grandeur scalaire : à chaque point de l'espace est associé un nombre ;
- champ **vectorel** pour une grandeur vectorielle : à chaque point de l'espace est associé un vecteur, donc trois composantes en 3D.

Représenter ces champs n'est pas complètement évident (Doc. 1).

Expérience : Champ scalaire et champ vectoriel

earth.nullschool.net

Le champ magnétique est donc un champ vectoriel. Pour le représenter, il faut indiquer en tout point sa norme, sa direction et son sens.

Propriété

Plutôt que des vecteurs, on représente les **lignes de champ magnétique** :

- elles sont en tout point **colinéaires** au champ magnétique ;
- elles sont toujours **fermées** et ne se croisent jamais ;
- leur **espacement** dépend de l'intensité du champ magnétique : plus elles se resserrent, plus le champ magnétique est intense.

Rq : Une zone de **champ uniforme** est donc caractérisée par des lignes de champ parallèles et régulièrement espacées.

1.2 Sources de champ magnétique

Expérience : Différentes sources de champ magnétique

Certains smartphones sont équipés d'un capteur de champ magnétique, grâce auquel on peut réaliser des mesures de champ magnétique avec Phyphox.

1. Localiser le capteur de champ magnétique du smartphone à l'aide d'un aimant permanent.
2. Que se remarque-t-on au voisinage d'un fil parcouru par un courant électrique ?

Un champ magnétique peut donc être créé par deux types de sources :

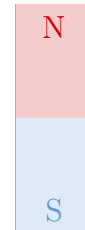
- les **aimants permanents** ;
- les circuits parcourus par des **courants électriques**.

Expérience : Lignes de champ magnétique autour de différentes sources

<https://youtu.be/9XvryuieFCQ>
sciences.univ-nantes.fr

Aimant droit (Doc. 2)

En présence d'un champ magnétique externe, certains matériaux comme le fer s'aimantent et peuvent conserver une partie de cette aimantation. Les aimants permanents sont obtenus à partir de tels matériaux, dits ferromagnétiques : fer, nickel, cobalt, etc. Ils permettent d'obtenir des champs magnétiques allant de 10 mT à 1 T, dont l'intensité décroît très rapidement quand on s'éloigne de l'aimant (les lignes de champ s'écartent).



Rq : Les lignes de champ « sortent » du pôle nord et « rentrent » au pôle sud.

Expérience d'Ørsted (XIX^{ème} siècle) : fil infini

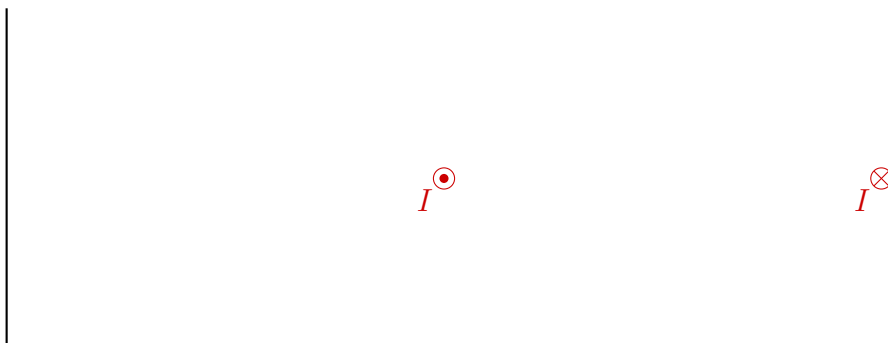
Expérience : Expérience d'Ørsted

<https://www.youtube.com/watch?v=2eXD9nv8Fb0>

Une aiguille de boussole est placée sous un fil de cuivre droit et horizontal. Ce fil est relié à un générateur qui impose un courant électrique I . Faire un schéma de l'expérience, vue du dessus, dans les cas où le courant est nul, positif puis négatif.



On considère un fil infini d'axe (Oz) parcouru par un courant d'intensité $I > 0$.



L'orientation des lignes de champ est donnée par la règle de la **main droite** :

- le pouce indique le sens du courant ;
- les doigts s'enroulent dans le sens du champ magnétique.

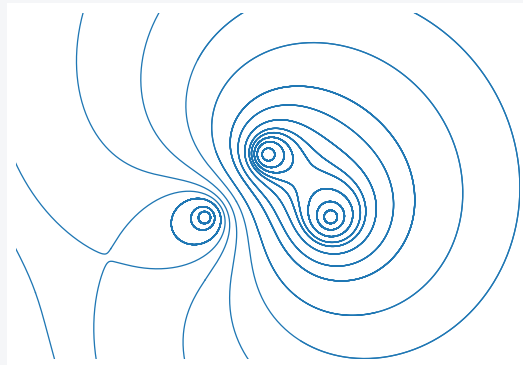
Le calcul du champ magnétique autour d'un infini est un classique de la deuxième année : en dehors du fil, le champ magnétique s'exprime

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

Application 1 – Carte de champ magnétique

La carte de champ ci-contre représente les lignes de champ au voisinage de quelques conducteurs parcourus par des courants électriques.

1. Identifier la position des sources et le sens des courants.
2. Identifier les zones de champs forts et les zones de champ faible.
3. Existe-t-il une zone où le champ est uniforme ?



Spire circulaire (Doc.3)

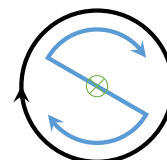
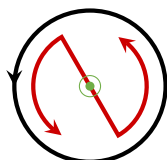
On considère une spire circulaire plane de rayon R parcourue par un courant d'intensité $I > 0$.



La règle de la main droite permet à nouveau de retrouver le sens du champ magnétique à partir du sens du courant :

- les doigts s'enroulent dans le sens du courant ;
- le pouce indique le sens du champ magnétique.

Rq : Moyen mnémotechnique pour les pôles nord et sud :



Rq : Le calcul du champ magnétique créé par une spire, n'est pas simple ! On peut toutefois montrer que, sur l'axe de la spire,

$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + z^2)^{3/2}} \vec{e}_z.$$

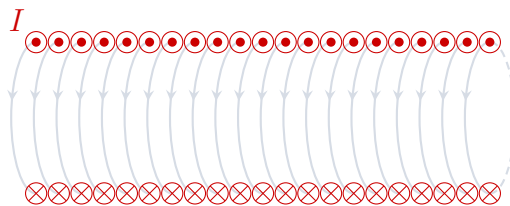
Solénoïde (bobine longue)

 **Champ magnétique créé par N spires régulièrement espacées**

`chapI1-ligne_de_champ.py`

Peut-on créer un champ uniforme avec quelques spires ? Que peut-on dire du champ magnétique à l'extérieur de la configuration obtenue ?

Un solénoïde est un enroulement régulier de fil. Il s'agit d'une bobine longue, c'est-à-dire une bobine dont le diamètre est faible devant sa longueur (en grec, *solen* signifie tuyau). On le modélise par une succession de N spires de même axe, régulièrement espacées, parcourues par un même courant d'intensité I . Le solénoïde est caractérisé par le nombre n de spires par unité de longueur $n = N/L$.



Le champ magnétique créé par le solénoïde est la somme du champ magnétique créé par chacune des spires qui le compose : c'est le **principe de superposition**.

Rq : On remarque que l'allure du champ magnétique créé par un solénoïde est très similaire à celui créé par un aimant droit. Dans un solénoïde infini ($L \gg R$) d'axe \vec{e}_z , le champ magnétique est **uniforme**. Il vaut $\vec{B} = \mu_0 n I \vec{e}_z$ à l'intérieur et est nul à l'extérieur.

Application 2 – IRM

On assimile la bobine principale d'un appareil d'IRM (Doc. 4) à un solénoïde de longueur $L = 1,6$ m, de 60 cm de diamètre, formé de $N = 2500$ spires. Il impose un champ statique $B_0 = 3$ T dans l'appareil.

Donnée : le champ magnétique B uniforme dans un solénoïde de N spires, de longueur L et parcouru par un courant d'intensité I vaut $B = \mu_0 N I / L$, où $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H · m⁻¹.

1. Comparer l'intensité du champ magnétique dans l'IRM à celle du champ magnétique terrestre.
2. Faire un schéma et représenter les lignes de champ magnétique.
3. Calculer l'intensité du courant qui parcourt la bobine de l'IRM. Commenter.

Rq : Aucune des expressions du champ magnétique n'est exigible. Elles seront rappelées, il faut savoir les exploiter.

Ordres de grandeur

Quelques ordres de grandeur à connaître :

- le champ magnétique terrestre dépend de la localisation sur le globe : il est plus intense au niveau des pôles qu'à l'équateur. On retiendra sa valeur moyenne : $50 \mu\text{T} = 5 \times 10^{-5} \text{T}$;
- l'intensité du champ créé au voisinage des aimants usuels se situe entre 10 mT et 1 T ;
- dans un IRM, le champ magnétique est de l'ordre de 1 T. Iseult, l'IRM le plus puissant au monde, produit un champ magnétique continu de 11,7 T ! Il est situé au CEA.

1.3 Obtention d'un champ uniforme

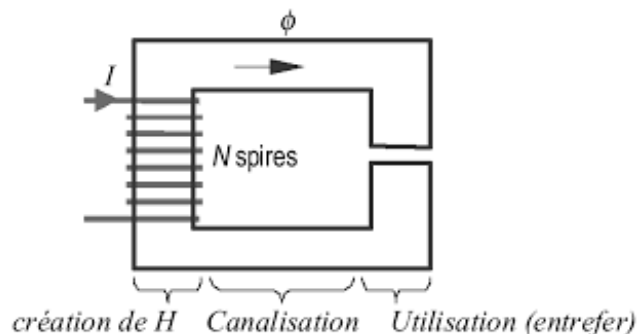
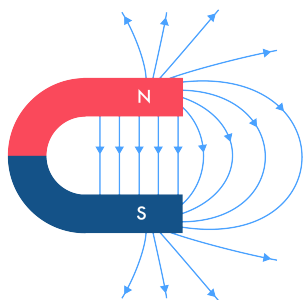
Certaines applications (IRM, etc) nécessitent d'obtenir un champ uniforme. Plusieurs dispositifs permettent de créer un tel champ.

Solénoïde

Comme on l'a vu, le champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde est uniforme, mais la zone de champ uniforme peut-être difficile d'accès (Doc. 4).

Aimant en U

Entre les branches d'un aimant permanent en U, ou dans l'entrefer d'un électro-aimant, on peut aussi obtenir un champ magnétique uniforme.



Bobines de Helmholtz

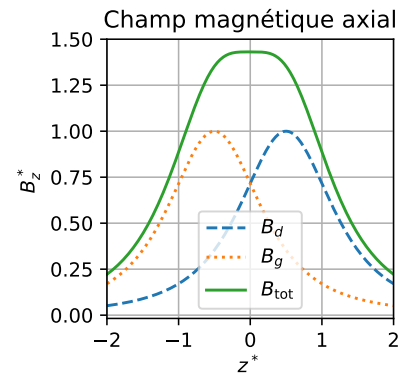
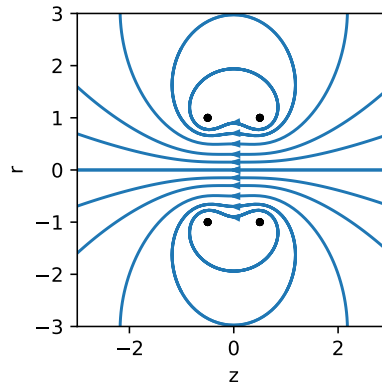
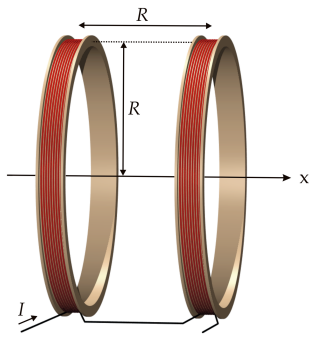
 [Bobines de Helmholtz](#)

[chapI1-ligne_de_champ.py](#) et [chapI1-helmholtz.py](#)

On dispose de deux bobines plates identiques. Comment les placer pour obtenir une zone de champ magnétique uniforme ? Où est située cette zone ?

On peut obtenir un champ magnétique uniforme avec deux bobines plates ($L \ll R$) identiques, de même axe et séparées d'une distance $d = R$ (schéma ci-dessous). Lorsque les deux bobines sont parcourues par un courant de même intensité et de même sens, les bobines sont alors en **configuration dite de Helmholtz**. Le champ magnétique est approximativement uniforme au voisinage de l'axe et au centre du dispositif pour une distance autour du centre petite devant d .

Rq : Si l'on inverse le sens du courant dans l'une des bobines, on obtient la configuration dite anti-Helmholtz. Elle permet d'obtenir un gradient uniforme de champ magnétique : le champ est nul au centre du dispositif et évolue linéairement le long de l'axe (cf. TD I1).



2 Moment magnétique

Loin de la source, les champs magnétiques produits par un aimant, une spire ou une bobine ont la même allure. À grande distance, on décrit leur effet en introduisant la notion de **moment magnétique**.

2.1 Moment magnétique d'une boucle de courant

On considère une boucle de courant plane, c'est-à-dire un circuit fermé plan parcouru par un courant électrique.



Définition

Un circuit plan fermé \mathcal{C} parcouru par un courant d'intensité I délimite une surface d'aire S . On définit le **vecteur surface** \vec{S} :

- de norme S ;
- de direction normale à la surface ;
- dont le sens, imposé par le sens choisi de l'intensité du courant, est donné par la règle du tire-bouchon.

On note parfois :

$$\vec{S} = S\vec{n},$$

avec \vec{n} un vecteur unitaire normal au plan de la spire, orienté dans le sens direct défini par le sens de l'intensité du courant dans la spire.

Rq : Le sens de \vec{S} dépend du choix d'orientation de l'intensité I du courant. Comme toujours, I est une grandeur algébrique, mais son signe n'a pas d'importance pour l'orientation de \vec{S} . Il s'agit bien d'un choix arbitraire qui, s'il n'est pas imposé, doit être défini à l'aide d'un schéma. Le respect de cette convention est ensuite impératif.

3.1 Force de Laplace

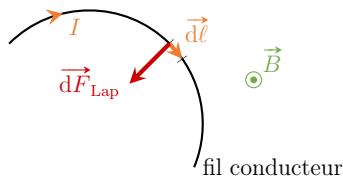
Lorsqu'il est parcouru par un courant électrique, un conducteur plongé dans un champ magnétique subit une force : c'est la **force de Laplace**.

Définition

Un élément de fil de longueur $d\ell$, parcouru par un courant d'intensité I , subit de la part d'un champ magnétique **extérieur** \vec{B} la **force de Laplace** élémentaire $d\vec{F}_{\text{Lap}}$:

$$d\vec{F}_{\text{Lap}} = I d\vec{\ell} \wedge \vec{B},$$

où $d\vec{\ell}$ est tangent au fil, de **même sens** que I et de norme $d\ell$.



Rq : Le choix de l'orientation de I doit **impérativement** être explicitement défini à l'aide d'un **schéma**.

Expérience : Rail de Laplace sans champ magnétique

Le barreau bouge-t-il si le champ magnétique est nul ?

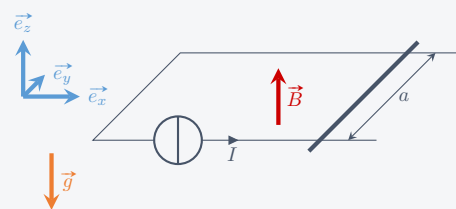
Rq : Le champ magnétique créé par le barreau ne donne pas lieu à une force de Laplace : dans l'expression de $d\vec{F}_{\text{Lap}}$, le champ magnétique est le champ **extérieur**.

Lien avec la force de Lorentz

La force de Laplace est la résultante macroscopique des forces de Lorentz qui s'exercent à l'échelle microscopique sur tous les porteurs de charge du fil, c'est-à-dire sur les électrons et les ions métalliques du réseau cristallin métallique. On peut l'expliquer avec l'effet Hall (TD I1).

Application 4 – Rail de Laplace

On considère le circuit représenté ci-contre, constitué d'un barreau métallique de masse m , libre de glisser sans frottement le long de deux rails parallèles séparés d'une distance a . Le circuit est fermé par une source idéale de courant qui impose un courant d'intensité $I > 0$. L'ensemble est plongé dans un champ magnétique uniforme et stationnaire $\vec{B} = B\vec{e}_z$, où $B > 0$.



<https://youtu.be/58MmOpSm4LY>

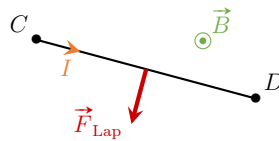
1. Exprimer la force de Laplace \vec{F}_{Lap} qui s'exerce sur le barreau métallique. Reproduire le schéma et représenter \vec{F}_{Lap} .
2. Établir l'équation différentielle du mouvement. Quel type de mouvement observe-t-on ?
3. Exprimer la puissance de la force de Laplace \mathcal{P}_{Lap} . Commenter.

4. Retrouver l'équation du mouvement avec un théorème énergétique.
5. La résoudre en supposant que le barreau est initialement immobile en $x = 0$.

Propriété

Une portion droite de conducteur entre deux points C et D , parcourue par un courant d'intensité I et plongée dans un champ magnétique uniforme \vec{B} est soumise à la force de Laplace :

$$\vec{F}_{CD} = \int_C^D I d\vec{\ell} \wedge \vec{B} = I (\overrightarrow{CD} \wedge \vec{B}).$$



Propriété

La puissance de la force de Laplace est donnée par

$$\mathcal{P}_{Lap} = \vec{F}_{Lap} \cdot \vec{v},$$

où \vec{v} est la vitesse du barreau mobile.

Rq : La puissance de la force de Laplace est a priori non nulle car la vitesse du barreau n'est pas forcément colinéaire à la vitesse des porteurs de charge du fil métallique.

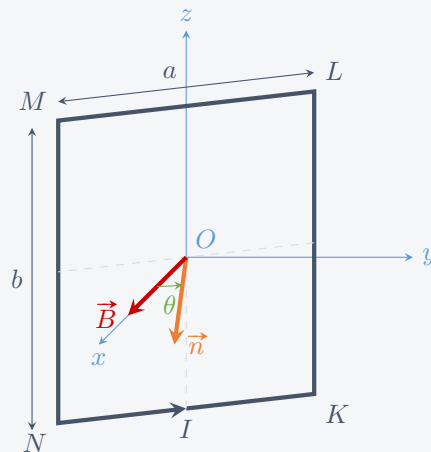
3.2 Couple magnétique

On souhaite décrire l'action d'un champ magnétique sur l'aiguille d'une boussole : on s'intéresse aux actions des forces de Laplace sur une spire de courant.

Application 5 – Couple magnétique

On considère une spire rectangulaire de largeur a et de hauteur b , parcourue par un courant d'intensité $I > 0$, en rotation autour de l'axe (Oz) , axe de symétrie de la spire passant par les deux milieux des côtés LM et KN , et placée dans un champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire orthogonal à l'axe $\vec{B} = B\vec{e}_x$ ($B > 0$). On note \vec{n} le vecteur normal à la spire, orienté par le sens du courant I , et α l'angle entre (Ox) et \vec{n} .

1. Montrer que la résultante des forces de Laplace qui s'appliquent sur cette spire est nulle.
2. Faire un schéma de la spire, vue du dessus.



3. Donner la direction des forces de Laplace qui s'exercent sur les segments LM et NK . Que peut-on dire de leur moment par rapport à l'axe (Oz) ?
4. Exprimer les forces de Laplace qui s'exercent sur les segments KL et MN . Les représenter sur le schéma précédent.
5. En déduire l'expression du couple Γ_{Lap} , moment des forces de Laplace qui s'exercent sur la spire par rapport à l'axe (Oz) .
6. Rappeler l'expression du moment magnétique $\vec{\mu}$ de la spire et exprimer Γ_{Lap} en fonction de $\vec{\mu}$ et \vec{B} .
7. Décrire qualitativement l'effet du champ magnétique sur le moment magnétique de la spire.

Propriété

Dans un champ magnétique \vec{B} uniforme, la résultante des forces de Laplace sur une spire **fermée** et **indéformable** \mathcal{C} est nulle :

$$\vec{F}_{\text{Lap}} = \oint_{\mathcal{C}} I d\vec{\ell} \wedge \vec{B} = \vec{0}$$

Propriété

Une spire de moment magnétique $\vec{\mu}$ plongée dans un champ magnétique \vec{B} uniforme subit un couple résultant des actions de Laplace dont le moment s'exprime

$$\vec{\Gamma}_{\text{Lap}} = \vec{\mu} \wedge \vec{B}$$

Comme il s'agit d'un couple, le moment du couple de Laplace ne dépend pas du point choisi pour le calculer.

Propriété

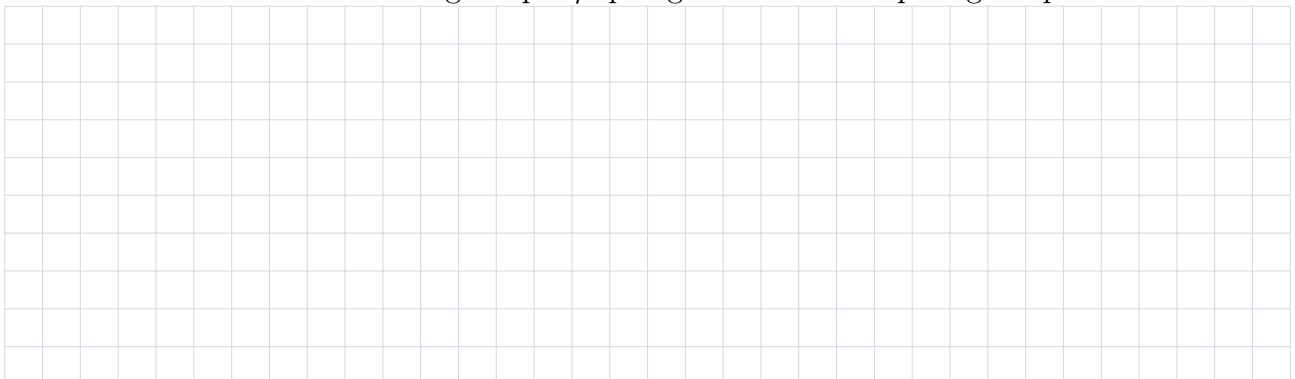
Dans le cas d'une spire en rotation autour d'un axe (Oz) à la vitesse angulaire ω , la puissance du couple magnétique s'exprime

$$\mathcal{P}_{\text{Lap}} = \Gamma_z \omega = \left(\vec{\Gamma}_{\text{Lap}} \cdot \vec{e}_z \right) \omega.$$

3.3 Action d'un champ magnétique sur un aimant

Alignement

On considère un moment magnétique $\vec{\mu}$ plongé dans un champ magnétique \vec{B} uniforme.



Propriété

Un moment magnétique tend à s'**aligner** (direction et sens) avec le champ magnétique dans lequel il est plongé.

Champ magnétique tournant

 python **Champ magnétique tournant**

`chapI1-champ_tournant.py`

La superposition de champs magnétiques harmoniques et orthogonaux suffit à obtenir un champ magnétique tournant, ce qui permet de mettre en rotation un moment magnétique. C'est sur ce principe que fonctionnent les moteurs électriques.