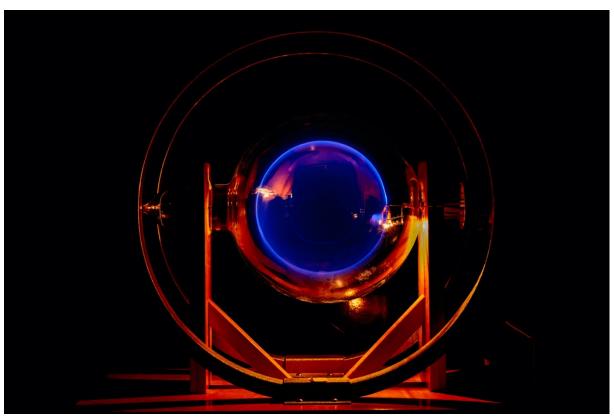
7.

Champ et force magnétiques



© Henri Weyer

Sommaire

1	Aim	nants	1
	1.1	Types d'aimants	1
	1.2	Pôles magnétiques	1
	1.3	Propriétés des aimants	2
2	Cha	amp magnétique	3
	2.1	Définition	3
	2.2	Caractéristiques	3
	2.3	Champ magnétique créé par plusieurs sources de champ	3
	2.4	Lignes de champs magnétiques	4
	2.5	Visualisation du champ magnétique – spectres magnétiques	4
	2.6	Champ magnétique terrestre	6
3	Elec	ctromagnétisme	8
	3.1	Expérience d'Oersted	8
	3.2	Champ magnétique d'un courant rectiligne	8
	3.3	Champ magnétique d'une spire de courant	9
	3.4	Champ magnétique d'un solénoïde	10
	3.5	Champ magnétique créé par des bobines de Helmholtz	11
	3.6	Modèle microscopique	12
	3.6.	.1 Aimants élémentaires	12
	3.6.	.2 Domaines de Weiss	12
	3.6.3	Méthodes d'aimantation et de désaimantation	13
4	Ford	ce de Lorentz	14
	4.1	Mise en évidence expérimentale	14
	4.2	Définition	14
	4.3	Caractéristiques de la force de Lorentz	15
	4.4	Applications techniques	16
	4.5	Phénomène naturel	17
5	Ford	ce de Laplace	18
	5.1	Mise en évidence expérimentale	18
	5.2	Interprétation microscopique	18
	5.3	Expression de la force de Laplace	19
	5.4	Définition	19
	5.5	Caractéristiques de la force de Laplace	20
	5.6	Application technique : le moteur électrique à courant continu	21
6	Pou	ur en savoir plus	23
7	Fyer	proices	27

1 Aimants

1.1 Types d'aimants

D'après les écrits de Thalès de Milet (ca. 600 av. J.-C.), les Grecs anciens ont découvert le phénomène du magnétisme en observant qu'un minerai de fer naturel, la magnétite (Fe₃O₄), attire de la limaille de fer. La magnétite est un aimant naturel qui est particulièrement abondante dans la région grecque *Magnesia* d'où elle tient son nom.

La première application technique du magnétisme était la boussole. Les Chinois, les Arabes et les Scandinaves l'utilisaient déjà vers le 12^e siècle pour naviguer.





À part les aimants naturels, on distingue :

 les aimants permanents artificiels : ils sont fabriqués en des matériaux qui se laissent fortement aimanter. Ces matériaux sont dits ferromagnétiques (Exemples : fer, cobalt, nickel). Les aimants au néodyme sont des aimants permanents puissants composé d'un alliage de néodyme, de fer et de bore (Nd₂Fe₁₄B). On les retrouve par exemple dans les disques durs des ordinateurs.



• les électroaimants : ils utilisent le fait qu'un courant électrique peut exercer des forces magnétiques dans son entourage (cf. section 4). Ils sont utilisés, par exemple, à la casse pour soulever de la ferraille.

1.2 Pôles magnétiques

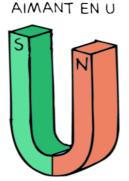
La force magnétique est particulièrement intense aux extrémités d'un aimant, appelées **pôles** magnétiques. On distingue entre le pôle Nord (N) et le pôle Sud (S).

Exemples

• Dans un **aimant droit** (ou **barreau aimanté**), le pôle *N* et le pôle *S* sont situés aux extrémités.



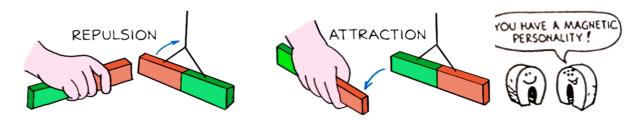
- Un aimant en U est simplement un aimant droit qui a été plié en forme de
 U. Ses pôles sont situés aux extrémités des deux branches.
- Les aimants conçus pour retenir des feuilles contre la porte du réfrigérateur sont constitués de fines bandes alternées de pôles N et S. Ces aimants ont une portée très courte car les pôles N et S sont proches et leurs effets s'annulent à courte distance.



1.3 Propriétés des aimants

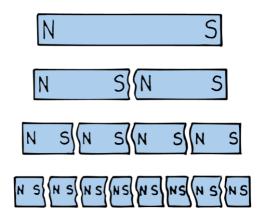
Lorsque le pôle N d'un aimant est approché du pôle N d'un autre aimant, les deux pôles se repoussent. Il en va de même si un pôle S est approché d'un pôle S. En revanche, si un pôle N est approché d'un pôle S, il y a attraction entre les deux pôles. En résumé :

Des pôles magnétiques de même nom se repoussent, des pôles magnétiques de noms différents s'attirent.



Cette propriété est similaire à celles des charges électriques. Il existe cependant une différence fondamentale entre les pôles magnétiques et les charges électriques qui est mise en évidence par l'expérience de l'aimant brisé :

Lorsqu'on brise un aimant droit en deux morceaux, on obtient deux nouveaux aimants droits, chacun ayant un pôle S, et ce indépendamment de la taille de l'aimant.



On peut en conclure qu'il est impossible d'isoler un pôle magnétique. En d'autres mots :

Il n'existe pas de monopôles magnétiques. Tout aimant possède un pôle N et un pôle S. Les pôles magnétiques apparaissent toujours par paires.

Un pôle N n'existe jamais sans la présence d'un pôle S, ou vice versa. En revanche, les charges électriques peuvent être isolées. Un électron chargé négativement ou un proton chargé positivement sont des entités en soi.

As-tu-compris?

1. L'attraction ou la répulsion entre deux charges électriques dépend des signes respectifs des charges. De quoi dépend l'attraction ou la répulsion d'aimants ?

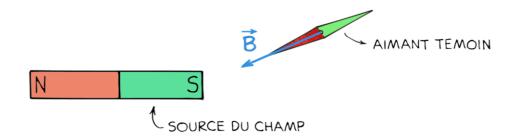
2 Champ magnétique

2.1 Définition

Il existe un **champ magnétique** en un point de l'espace si un aimant témoin (par exemple une aiguille aimantée) y est soumis à une force magnétique.

2.2 Caractéristiques du vecteur champ magnétique

Le champ magnétique est vectoriel ; il est caractérisé par le vecteur champ magnétique \vec{B} .

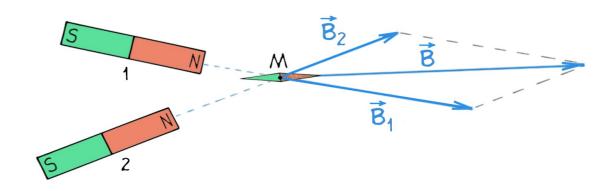


- 1. Origine : \vec{B} est associé à tout point de l'espace où règne le champ magnétique
- 2. Direction : celle indiquée par une aiguille aimantée placée au point considéré
- 3. Sens : celui où pointe le pôle Nord de l'aiguille aimantée
- Intensité: celle du champ magnétique. Son unité SI est le tesla¹: [B] = 1 tesla = 1 T
 L'instrument de mesure de l'intensité du champ magnétique est le teslamètre.

2.3 Champ magnétique créé par plusieurs sources de champ

Le vecteur champ magnétique \vec{B} créé en un point de l'espace par plusieurs sources de champ Si (i=1,...,n) est égal à la somme vectorielle des vecteurs champ magnétique \vec{B}_i , créés par chacune des sources de champ au point considéré :

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \dots + \vec{B}_n = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i$$



¹ En l'honneur du physicien serbo-américain Nikola Tesla (1856-1943)

2.4 Lignes de champs magnétiques

La **ligne de champ magnétique** est une courbe de l'espace à laquelle le vecteur champ magnétique est tangent en tout point. Elle est orientée dans le sens du champ magnétique.

Figure:

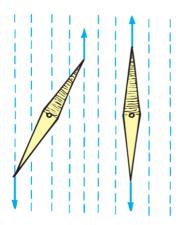


Propriétés des lignes de champ magnétique :

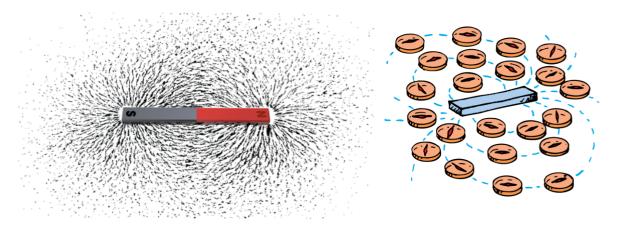
- elles ne se coupent jamais ;
- toute ligne de champ forme une boucle fermée : à l'extérieur d'un aimant la ligne de champ passe du pôle Nord au pôle Sud, à l'intérieur de l'aimant du pôle Sud au pôle Nord ;
- la direction et le sens d'une ligne de champ sont en tout point de l'espace les mêmes que ceux du vecteur champ magnétique respectif;
- la densité des lignes de champ est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique.

2.5 Visualisation du champ magnétique – spectres magnétiques

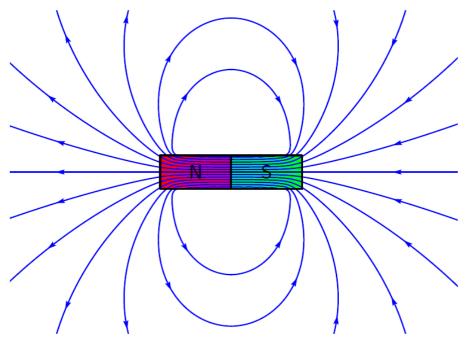
Lorsqu'on dispose des boussoles autour d'un aimant, les aiguilles des boussoles s'orientent selon le champ magnétique de l'aimant, le Nord des boussoles indiquant le sens des lignes de champ. En saupoudrant de la limaille de fer plus ou moins uniformément autour de l'aimant, on constate que la limaille trace un ensemble de lignes de champ, appelée **spectre magnétique**. Les grains de limaille s'aimantent sous l'influence du champ magnétique de l'aimant et deviennent de petits aimants. Ils s'alignent et s'orientent selon le champ magnétique. Il en résulte des chaînes de grains de limaille qui matérialisent les lignes de champ.



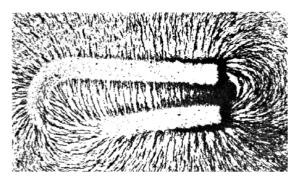
Spectre magnétique d'un aimant droit (barreau aimanté) :



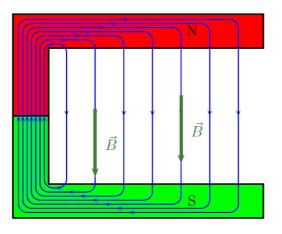
Les lignes de champ émergent du pôle N et aboutissent au pôle S et forment des boucles fermées. Le champ magnétique est intense aux pôles, ce qui se traduit par une grande densité de lignes de champ autour des pôles.



• Spectre magnétique entre les branches d'un aimant en U



Spectre magnétique d'un aimant en U visualisé à l'aide de limaille de fer, Frank Eugene Austen (1916) Examples in Magnetism, 2nd Ed., Hanover, N.H., USA, p.31, plate 2, domaine public



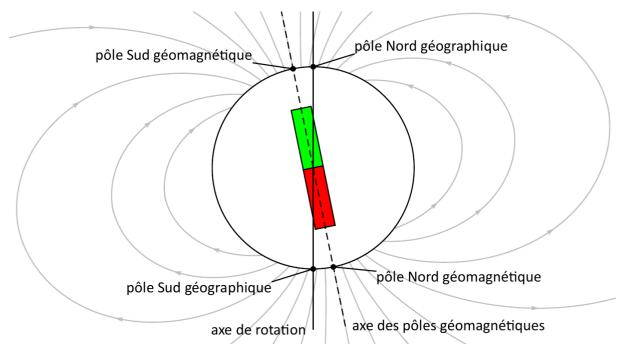
Entre les branches d'un aimant en U, les lignes de champ sont parallèles (perpendiculaires aux branches de l'aimant) et équidistantes : le champ magnétique \vec{B} y est **uniforme**. Il a même direction, même sens et même intensité en chaque point : $\vec{B} = \overrightarrow{\text{const}}$

As-tu-compris?

- **3.** Rajouter le vecteur champ magnétique en quelques endroits du spectre magnétique de l'aimant droit.
- 4. Où à la surface d'un barreau aimanté l'intensité du champ magnétique est-elle...
 - a. minimale?
- b. maximale?

2.6 Champ magnétique terrestre

L'aiguille d'une boussole pointe vers le Nord car la Terre est elle-même un aimant et l'aiguille s'oriente selon le champ magnétique de la Terre. Le champ magnétique terrestre peut être assimilé à celui d'un immense aimant droit dont le centre se situe approximativement au centre de la Terre et dont l'axe longitudinal est incliné d'environ 10° par rapport à l'axe de rotation de la Terre. L'axe longitudinal de cet aimant fictif définit les positions des pôles magnétiques théoriques (pôles géomagnétiques), l'axe de rotation de la Terre celles des pôles géographiques. Cependant, les vrais pôles magnétiques, endroits où l'on observe que le champ magnétique terrestre est effectivement perpendiculaire à la surface de la Terre, ne coïncident pas tout à fait avec les pôles géomagnétiques et ne sont pas non plus diamétralement opposés.



Pour une raison historique, le pôle magnétique de l'aiguille aimantée d'une boussole qui indique le Nord est appelé le pôle « Nord » magnétique de l'aiguille. Près du pôle Nord géographique doit donc se trouver le pôle Sud magnétique, et inversement. Le pôle Sud magnétique est actuellement situé à près de 500 kilomètres du pôle Nord géographique et se déplace rapidement en direction de la Sibérie.



Le vecteur champ magnétique peut être décomposé en une composante horizontale \vec{B}_H qui pointe vers le pôle Sud magnétique et en une composante verticale \vec{B}_V qui pointe vers le centre de la Terre :

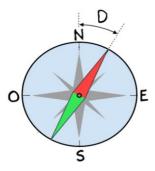
$$\vec{B} = \vec{B}_H + \vec{B}_V.$$

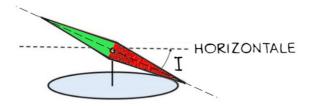
vers le pôle Nord géographique vers le pôle Sud magnétique \vec{B}_V

vers le centre de la Terre

En un lieu donné, le champ magnétique terrestre est caractérisé par trois paramètres :

- 1. L'aiguille aimantée d'une boussole, qui matérialise la direction de \vec{B}_H , n'est pas exactement dirigée selon le méridien géographique, mais selon le méridien magnétique. L'angle formé en un lieu entre les méridiens géographique et magnétique est appelé **déclinaison magnétique** (symbole : D).
- 2. Le vecteur du champ magnétique terrestre n'est en général pas contenu dans le plan horizontal. L'angle qui est formé par le vecteur du champ magnétique terrestre et le plan horizontal est appelé inclinaison magnétique (symbole : I).





3. Son intensité *B*

Au Luxembourg, en 2022 : $D = 2.5^{\circ}$ Est, $I = 65^{\circ}$ vers le bas et $B = 49 \mu T$

As-tu-compris?

- 5. Une boussole basculante est une aiguille aimantée qui peut pivoter autour d'un axe horizontal. En quels endroits sur Terre l'aiguille d'une telle boussole s'oriente-t-elle quasiment selon la verticale ? En quels endroits quasiment selon l'horizontale ?
- 6. L'aiguille d'une boussole pointe-elle vers le Nord lorsqu'on se trouve dans l'hémisphère Sud?

3 Electromagnétisme

3.1 Expérience d'Oersted

Les domaines du magnétisme et de l'électricité se sont développés indépendamment jusqu'en 1820. C'est alors que le physicien danois Christian Oersted découvre par hasard, lors d'une expérience de démonstration, qu'un courant électrique influence une boussole. Voici une expérience qui met en évidence ce phénomène :

Un fil conducteur connecté à une source de tension est tendu parallèlement au-dessus d'une aiguille aimantée qui est initialement dirigée selon le méridien magnétique.

Observations:

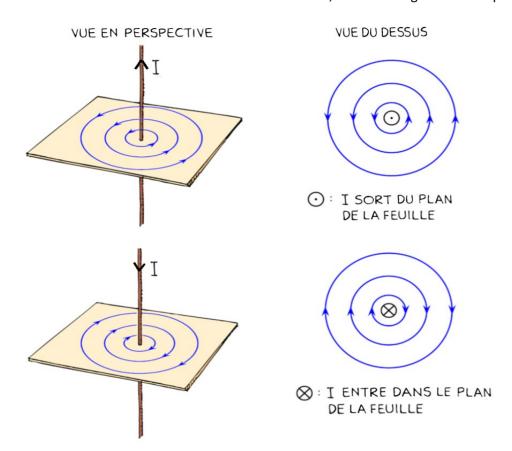
- Si I = 0, l'aiguille est parallèle au fil ;
- Si $I \neq 0$, l'aiguille s'oriente plus ou moins perpendiculairement au fil ;
- Si *I* change de sens, l'orientation de l'aiguille s'inverse.

Conclusion:

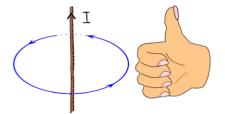
Tout courant électrique crée un champ magnétique dans son entourage.

3.2 Champ magnétique d'un courant rectiligne

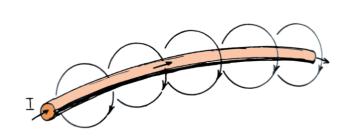
Les lignes de champ magnétique d'un fil rectiligne parcouru par un courant sont des cercles concentriques centrées sur le fil dans chaque plan perpendiculaire au fil. On dit que le champ magnétique d'un courant rectiligne est *orthoradial*. L'intensité du champ magnétique diminue avec la distance radiale au conducteur. En inversant le sens du courant, le sens des lignes de champ s'inverse.



La **règle de la main droite #1** permet de déterminer le sens du vecteur champ magnétique en fonction du sens de courant et vice-versa :



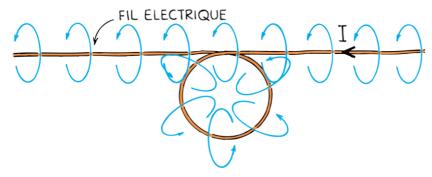
Lorsque le pouce de la main droite pointe dans le sens du courant, les doigts recourbés indiquent le sens des lignes de champ magnétique respectivement celui du vecteur champ magnétique.



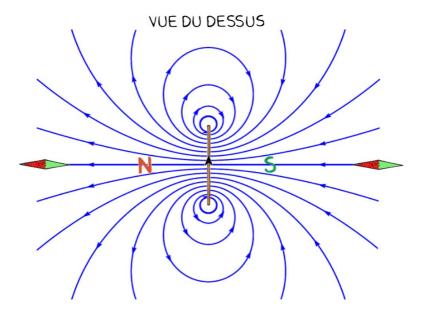


3.3 Champ magnétique d'une spire de courant

Lorsque le câble est enroulé en forme de spire, les lignes de champ magnétique se concentrent à l'intérieur de la spire. Le champ magnétique y est donc plus intense.



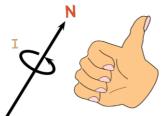
Le spectre d'une spire de courant ressemble à celui d'un aimant droit. La face par laquelle les lignes de champ magnétique sortent de la spire se comporte comme le pôle Nord d'un aimant : on l'appelle face Nord de la spire. La face par laquelle les lignes de champ magnétique entrent dans la spire se comporte comme le pôle Sud d'un aimant : on l'appelle face Sud de la spire.



Dans un plan perpendiculaire à la spire et contenant son centre, le champ magnétique créé par la spire peut être considéré comme superposition de deux champs magnétiques créés par des fils rectilignes parallèles traversés par des courants en sens inverse. À l'intérieur de la spire, le champ magnétique créé par le courant entrant dans le plan et celui créé par le courant sortant du plan se renforcent mutuellement, à l'extérieur de la spire ils s'annulent partiellement.

La **règle de la main droite #2** permet de déterminer le sens du champ magnétique à l'intérieur de la spire en fonction du sens de courant et vice-versa :

Lorsque les doigts recourbés de la main droite indiquent le sens du courant, le pouce pointe vers la face Nord de la spire.



En enroulant N tours d'un fil conducteur isolé sur un court cylindre on obtient une bobine à N spires. La superposition des champs magnétiques créés par les spires individuelles conduit :

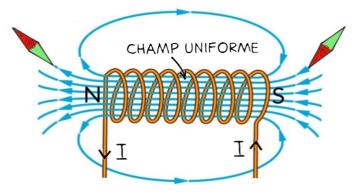
- à l'intérieur de la bobine plate, à un champ magnétique \vec{B} intense ;
- à l'extérieur de la bobine plate, à un champ magnétique négligeable, sauf sur l'axe de la bobine.

Les caractéristiques du champ magnétique \vec{B} sont les mêmes que celles du champ magnétique créé par une seule spire de courant, mais l'intensité du champ magnétique est à multiplier par N.

3.4 Champ magnétique d'un solénoïde

Un solénoïde (du mot grec *solen* : tuyau) est une bobine très longue. La superposition des champs magnétiques créés par les spires individuelles conduit :

- à **l'intérieur** du solénoïde, à un champ magnétique \vec{B} uniforme et intense. Les lignes de champ magnétique y sont parallèles et équidistantes ;
- à l'extérieur du solénoïde, à un champ magnétique négligeable, sauf sur l'axe du solénoïde. Les lignes de champs sortent par la face nord du solénoïde et entrent par la face sud.



Caractéristiques du champ magnétique uniforme \vec{B} à l'intérieur du solénoïde :

- 1. Origine : tout point à l'intérieur du solénoïde
- 2. Direction : celle de l'axe du solénoïde
- 3. Sens: déterminé à l'aide de la règle de la main droite #2
- 4. Intensité (norme):

$$B = \mu_0 \frac{N}{L} I$$

 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \; rac{ ext{Tm}}{ ext{A}} \, ext{est la perméabilité magnétique du vide}$

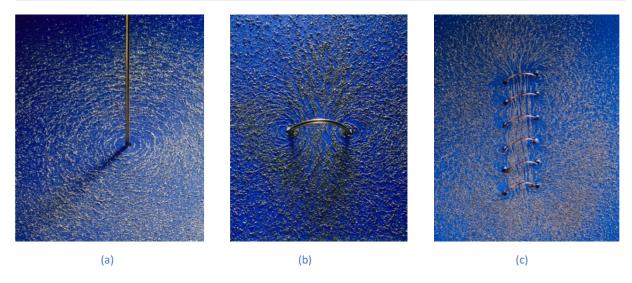
N est le nombre de spires

L est la longueur du solénoïde (en m)

I est l'intensité du courant électrique (en A) à travers le solénoïde

L'expression donnant l'intensité B du champ magnétique \vec{B} créé par un solénoïde reflète une propriété générale des champs magnétiques qui sont créés par des courants électriques :

L'intensité du champ magnétique créé par un courant est proportionnelle à l'intensité du courant électrique qui le crée : $B \sim I$



Spectres magnétiques d'un fil rectiligne (a), d'une spire circulaire (b) et d'un solénoïde (c)

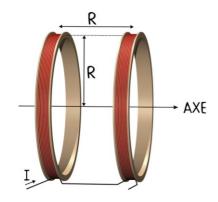
© Richard Megna FUNDAMENTAL PHOTOGRAPHS, NYC

3.5 Champ magnétique créé par des bobines de Helmholtz

Les bobines de Helmholtz sont constituées par deux bobines plates circulaires de même rayon R qui sont montées en regard sur le même axe à la distance R et qui sont parcourues par des courants dans le même sens.

Hermann von Helmholtz (1821-1894) a trouvé par calcul que le champ magnétique entre les bobines est uniforme à excellente approximation et ce dans un assez grand domaine.

Le champ magnétique a la direction de l'axe longitudinal des bobines. Son sens peut être trouvé à l'aide de la règle de la main droite.



Bobines de Helmholtz par Ansgar Hellwig sous licence CC BY-SA 2.0.

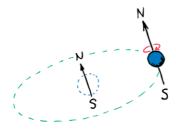
As-tu-compris?

- 7. Un solénoïde est branché à un générateur de courant continu.
 - **a.** Effectuer un schéma du montage et y insérer le générateur, le courant électrique à travers la bobine, les lignes de champ magnétique ainsi que les pôles des deux faces de la bobine.
 - **b.** Déterminer la valeur du champ magnétique si le solénoïde a une longueur de 5 cm, contient 1000 spires et est parcouru par un courant d'intensité 6 A.
- **8.** Déterminer la direction et le sens du champ magnétique des bobines de Helmholtz représentées ci-dessus.

3.6 Modèle microscopique

3.6.1 Aimants élémentaires

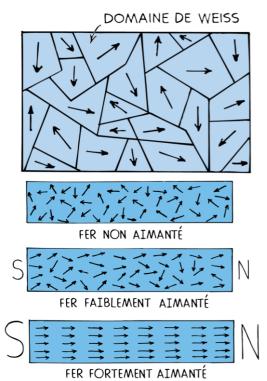
Le champ magnétique d'un aimant permanent est créé par le mouvement de charges électriques à l'intérieur de l'aimant (électrons en orbite autour des noyaux atomiques et spins des électrons) qui engendre un champ magnétique élémentaire des atomes².



3.6.2 Domaines de Weiss

Dans un corps ferromagnétique, les interactions magnétiques entre atomes voisins causent des groupes d'atomes à s'orienter dans le même sens. Ces groupes d'atomes alignés sont appelés domaines magnétiques ou domaines de Weiss. Sans influence extérieure, le champ magnétique résultant de ces domaines est nul car les domaines sont orientés aléatoirement. Le corps macroscopique n'est donc pas aimanté.

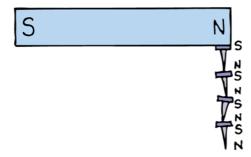
En revanche, si on introduit le corps ferromagnétique dans un champ magnétique extérieur intense, les domaines de Weiss ont tendance à s'orienter selon ce champ extérieur. Une fois les domaines orientés, l'interaction entre les domaines assure qu'une forte aimantation globale persiste, même si on annule le champ magnétique extérieur. On a alors créé un aimant permanent.



Le modèle microscopique permet par exemple d'expliquer pourquoi un aimant droit brisé donne deux nouveaux aimants droits, chacun avec un pôle N et un pôle S :



Lorsqu'un clou faiblement aimanté est retiré de l'aimant droit, l'agitation thermique cause la plupart des domaines à reprendre une orientation aléatoire. Une aimantation résiduelle peut cependant subsister.



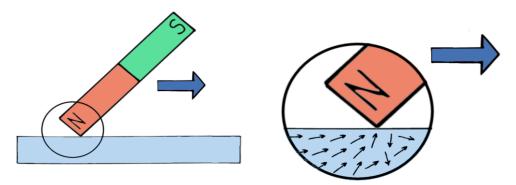
² La plupart des matériaux ne sont pas magnétiques, parce que les champs microscopiques élémentaires se neutralisent à cause des spins opposés de leurs électrons.

3.6.3 Méthodes d'aimantation et de désaimantation

Pour **aimanter** un corps ferromagnétique, il faut orienter ses domaines de Weiss dans une même direction et un même sens. Méthodes :

À l'aide d'un aimant permanent :

On glisse le corps à aimanter le long d'un pôle d'un aimant, toujours dans le même sens.



À l'aide d'un électroaimant :

On introduit le corps à aimanter à l'intérieur de la bobine d'un électroaimant qui est parcouru par un courant continu.

Pour désaimanter un corps ferromagnétique, il faut orienter ses domaines de Weiss de façon aléatoire.

Méthodes:

- Frapper le corps aimanté violemment contre un corps dur.
- Placer le corps aimanté dans une bobine parcourue par un courant alternatif dont on diminue progressivement l'intensité.
- Chauffer le corps aimanté au-delà d'une température limite, appelée température de Curie. La température de Curie est caractéristique du matériau ferromagnétique.

Par exemple : $\vartheta_{Curie}(Fe) = 768 \, ^{\circ}\text{C}$

As-tu compris?

- **9.** Pourquoi l'intensité du champ magnétique d'un aimant devient-il plus faible lorsqu'on le laisse tomber sur un sol dur ?
- **10.** Si on approche un clou du pôle Nord d'un aimant, le clou sera attiré. Si on l'approche du pôle Sud de l'aimant, il sera également attiré. Pourquoi ?
- **11.** Expliquer pourquoi la source du champ magnétique terrestre ne peut pas être un énorme aimant permanent se trouvant au centre de la Terre.

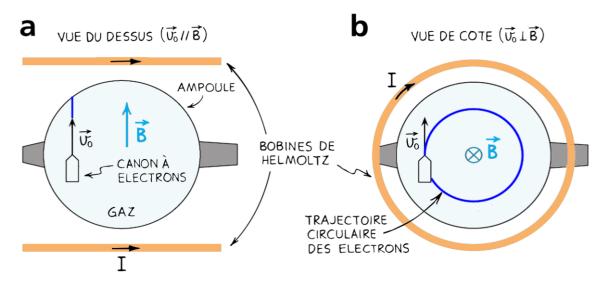
4 Force de Lorentz

4.1 Mise en évidence expérimentale

Un canon à électrons sert à produire un faisceau d'électrons monocinétique de vecteur vitesse initiale $\overrightarrow{v_0}$. Le faisceau d'électrons est injecté dans une ampoule de verre qui contient du gaz dihydrogène ou néon sous faible pression. À la suite des collisions avec des électrons, quelques molécules de gaz sont excitées ou s'ionisent. Lorsque ces molécules retournent à l'état fondamental, elles émettent de la lumière qui est en partie visible ; la trajectoire des électrons apparaît alors dans une couleur caractéristique au gaz. L'ampoule peut être complètement plongée dans un champ magnétique uniforme \overrightarrow{B} créé par des bobines de Helmholtz.

Observations:

- En l'absence du champ magnétique les électrons ne sont pas déviés. (Mouvement rectiligne)
- En présence du champ magnétique, les électrons :
 - a) ne sont pas déviés lorsque $\overrightarrow{v_0}$ est colinéaire à \overrightarrow{B} (mouvement rectiligne);
 - **b)** sont contraints sur un cercle lorsque $\overrightarrow{v_0} \perp \overrightarrow{B}$, la déviation se faisant dans le sens opposé si l'on inverse le sens de $\overrightarrow{v_0}$ ou le sens de \overrightarrow{B} (mouvement circulaire);
 - c) sont contraints sur une hélice circulaire dans tous les autres cas (Mouvement hélicoïdale pouvant être interprété comme superposition des mouvements circulaire et rectiligne précédents).



On conclut que les électrons qui se déplacent dans un champ magnétique sont déviés par une force magnétique qui est à la fois perpendiculaire à leur vecteur vitesse et perpendiculaire au champ magnétique. Cette force porte le nom de **force de Lorentz**.

4.2 Définition

Une particule de charge q se déplaçant avec un vecteur vitesse \vec{v} dans un champ magnétique \vec{B} subit une force magnétique \vec{F}_m , appelée force de Lorentz, telle que :

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Le symbole \times (ou \wedge) est l'opérateur mathématique du produit vectoriel.

4.3 Caractéristiques de la force de Lorentz

- 1. Point d'application : la particule de charge q
- 2. Direction : perpendiculaire au plan formé par $q\vec{v}$ et \vec{B} (fig. 1)
- 3. Sens: déterminé à l'aide de la règle de la main droite (fig. 2):
 - Le pouce suivant $q\vec{v}$ (dans le sens de \vec{v} si q>0, dans le sens opposé si q<0)
 - \circ L'index suivant le champ magnétique \vec{B}
 - Le majeur indique alors le sens de la force magnétique \dot{F}_m
- 4. Intensité (norme) : $F_m = |q| v B \sin \alpha$, où α est l'angle formé entre $q\vec{v}$ et \vec{B} L'intensité F_m correspond à l'aire du parallélogramme formé par $q\vec{v}$ et \vec{B} .

Unité SI :
$$N = C \cdot \frac{m}{s} \cdot T$$

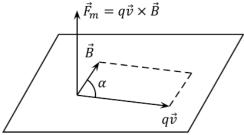


Fig. 1: Direction de la force de Lorentz

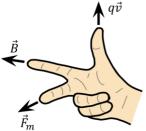
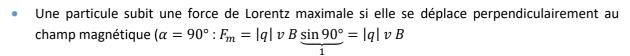


Fig. 2: Règle de la main droite

Remarques

- Une particule ne subit pas de force de Lorentz :
 - \circ si elle est électriquement neutre (q = 0)
 - o si elle est au repos (v = 0)
 - o en l'absence de champ magnétique (B = 0)
 - o si elle se déplace dans la direction du champ magnétique ($\alpha = 0$ ou $180^{\circ} \Rightarrow \sin \alpha = 0$)

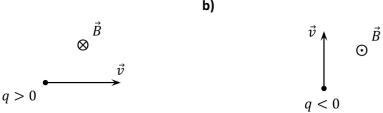


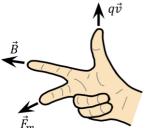
Puisque la force de Lorentz est toujours normale au vecteur vitesse de la particule, elle n'effectue aucun travail sur la particule. D'après le TEC, un champ magnétique peut dévier une particule chargée en mouvement, mais il ne peut jamais varier la norme de la vitesse! Le mouvement d'une particule sous l'influence seule d'un champ magnétique est donc toujours uniforme.

As-tu compris?

a)

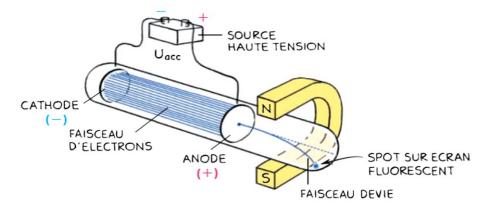
- Pourquoi un neutron dans un champ magnétique ne subit-il pas de déviation ? 1.
- Représenter la force de Lorentz s'exerçant sur la particule pour les deux situations suivantes : 2.





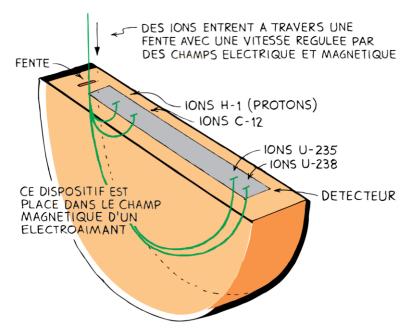
4.4 Applications techniques

- Le tube cathodique est un tube à vide qui comporte dans sa forme la plus simple :
 - une cathode, entourant un filament de chauffage qui émet des électrons par effet thermoïonique;
 - une anode, percée d'un trou, créant ensemble avec la cathode émissive, par rapport à laquelle elle se trouve à une tension $U_{\rm acc} > 0$, un champ électrique qui accélère les électrons ;
 - un écran fluorescent sur lequel l'impact du faisceau d'électrons produit un spot lumineux.



Le faisceau électronique peut être dévié à l'aide d'un champ magnétique qui est p.ex. créé par des bobines (non montrées). Si la déviation se fait rapidement on peut dessiner des courbes sur l'écran voire produire des figures ou images. Le tube cathodique à déviation magnétique était longtemps la pièce maîtresse d'écrans de télévisions ou d'ordinateurs. Ces types d'écrans ont cependant été largement supplantés par les écrans à cristaux liquides (LCD) et les écrans électroluminescents (OLED ou QLED).

 Dans un spectrographe de masse, des ions sont déviés à l'aide d'un champ magnétique, puis récupérés par un détecteur sur lequel la position des ions va permettre d'analyser leur composition.



• Dans un **cyclotron**, des particules chargées sont déviées à l'aide d'un champ magnétique, mais aussi accélérées à l'aide d'un champ électrique afin d'atteindre des vitesses vertigineuses.

4.5 Phénomène naturel



L'aurore polaire est un phénomène lumineux qui a lieu dans la haute atmosphère. La Terre est en permanence bombardée par des particules chargées en provenance de l'espace. Ce rayonnement cosmique est

composé de particules chargées, avant tout des électrons et des protons venant du Soleil (vent solaire). Elles sont déviées par le champ

magnétique terrestre et suivent les lignes de champ sur des trajectoires hélicoïdales. Au niveau des pôles, les particules entrent en collision avec les molécules de l'air atmosphérique. Les molécules sont alors excitées ou ionisées et émettent de la lumière lorsqu'elles se désexcitent. La couleur de la lumière dépend de la nature du gaz.



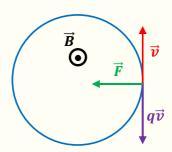
Exercice résolu 1

Énoncé : Dans le dispositif expérimental de la page titre (photo), des électrons sont injectés à une vitesse de 1800 km/s vers le haut. L'intensité du courant électrique dans les bobines de Helmholtz est telle que l'intensité du champ magnétique uniforme entre les bobines vaut $10^{-4}~\rm T.$

- **a.** En analysant la trajectoire des électrons sur la photo, déterminer le sens du champ magnétique régnant entre les bobines de Helmholtz.
- **b.** Calculer l'intensité de la force de Lorentz.
- **c.** On tourne l'ampoule d'un quart de tour autour de son axe. Que devient alors la trajectoire des électrons ? Justifier.

Solutions:

a. D'après la règle de la main droite, \vec{B} sort dans le plan de la feuille :



b. Intensité de la force de Lorentz :

$$F_m = |q| v B \sin \alpha$$

Puisque q=-e et $\alpha=90^{\circ}$, il vient :

$$F_m = e v B$$

A.N.:

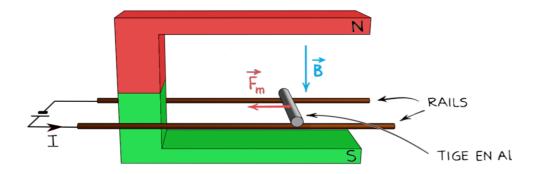
$$F_m = 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 1,8 \cdot 10^6 \cdot 10^{-4} = 2,9 \cdot 10^{-17} \text{ N}$$

c. Le vecteur champ magnétique \vec{B} devient colinéaire à \vec{v} et donc, d'après $\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}$, on a $F_m = 0$ (car $\alpha = 0$ ou $\alpha = 180^\circ$). D'après le principe d'inertie, les électrons effectuent un MRU.

5 Force de Laplace

5.1 Mise en évidence expérimentale

Une tige en aluminium est placée dans le champ magnétique d'un aimant en U, perpendiculairement à deux rails conducteurs horizontaux et parallèles qui sont connectés à une batterie :



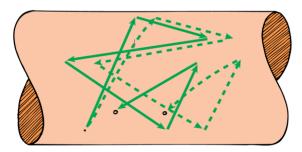
Observations:

- Lorsqu'on fait passer un courant dans les rails et la tige, la tige se déplace en restant perpendiculaire aux rails.
- Si l'on inverse le sens du courant (inversion des pôles de la batterie) ou si l'on inverse le sens du champ magnétique (rotation de l'aimant de 180 degrés autour de son axe longitudinal), la tige se déplace dans l'autre sens que précédemment.
- Si le champ magnétique est dirigé parallèlement à la tige, la tige ne se déplace pas.

On conclut qu'un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique subit une force magnétique. La force magnétique est dirigée perpendiculairement au conducteur et perpendiculairement au champ magnétique. Cette force porte le nom de **force de Laplace**.

5.2 Interprétation microscopique

Le courant électrique qui traverse un conducteur métallique est un déplacement orienté d'électrons libres, qui sont animés d'un mouvement très varié. Les chocs avec les ions du réseau métallique les ralentissent, le champ électrique créé par le générateur les accélère. Leur vitesse de dérive est de l'ordre de seulement quelques millimètres par minute.



La trajectoire en trait continu représente le mouvement désordonné d'un électron libre sans courant électrique. La trajectoire en pointillé représente le mouvement de l'électron dans le cas d'un courant électrique vers la gauche (mouvement orienté de l'électron vers la droite).

Lorsqu'on place un conducteur dans un champ magnétique et on le fait traverser par un courant électrique, chaque électron va subir la force de Lorentz. La résultante des forces de Lorentz sur les électrons en mouvement dans le conducteur s'identifie à la force de Laplace sur le conducteur.

5.3 Expression de la force de Laplace

Considérons un conducteur métallique rectiligne de longueur ℓ et de section S, parcouru par un courant d'intensité I et plongé dans un champ magnétique uniforme \overrightarrow{B} qui lui est perpendiculaire. La force de Lorentz s'exerçant sur un électron de conduction s'écrit :

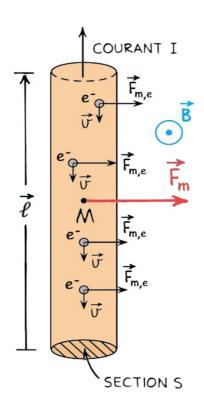
$$\vec{F}_{m.e} = q\vec{v} \times \vec{B} = -e \ \vec{v} \times \vec{B}$$

Soit N le nombre d'électrons se trouvant à un instant donné dans le volume considéré. En supposant que tous les électrons se déplacent à la même vitesse de dérive \vec{v} , la force magnétique résultante appliquée au milieu M du conducteur s'écrit :

$$\vec{F}_m = N \cdot \vec{F}_{m,e} = -N \ e \ \vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

En supposant que les électrons de conduction parcourent la distance ℓ pendant la durée Δt :

$$v = \frac{\ell}{\Delta t}$$



En introduisant le **vecteur longueur** $\vec{\ell}$, orienté dans le sens du courant et de norme ℓ :

$$\vec{v} = -\frac{\vec{\ell}}{\Lambda t} \tag{2}$$

Le signe moins traduit le fait que les électrons de conduction se déplacent dans le sens inverse du sens conventionnel du courant.

En insérant (2) dans (1) :

$$\vec{F}_m = N \, e \frac{\vec{\ell}}{\Delta t} \times \vec{B} \tag{3}$$

La charge positive transportée pendant la durée Δt valant Ne, l'intensité du courant s'écrit :

$$I = \frac{Ne}{\Delta t} \tag{4}$$

En insérant (4) dans (3):

$$\vec{F}_m = I \, \vec{\ell} \times \vec{B}$$

5.4 Définition

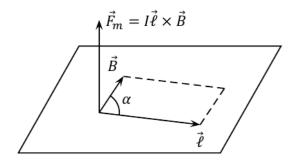
Un conducteur rectiligne parcouru par un courant électrique d'intensité I et plongé sur sa longueur ℓ dans un champ magnétique \vec{B} subit une force magnétique \vec{F}_m , appelée force de Laplace, telle que :

$$\vec{F}_m = I \vec{\ell} \times \vec{B}$$

 $\vec{\ell}$ est orienté dans le sens du courant et de norme ℓ .

5.5 Caractéristiques de la force de Laplace

- 1. Point d'application : centre de la partie du conducteur qui est plongée dans le champ magnétique
- 2. Direction: perpendiculaire au plan formé par $\vec{\ell}$ et \vec{B} (fig. 3)
- 3. Sens: déterminé à l'aide de la règle de la main droite (fig. 4)
 - Le pouce suivant $\vec{\ell}$ c.-à-d. dans le sens du courant
 - \circ L'index suivant le champ magnétique \vec{B}
 - \circ Le majeur indique alors le sens de la force magnétique $ec{F}_m$
- 4. Norme : $F_m = I \ \ell \ B \sin \alpha$, où α est l'angle formé entre $\vec{\ell}$ et \vec{B}



 \vec{F}_m

Fig. 3 : Direction de la force de Laplace

Fig. 4: Règle de la main droite

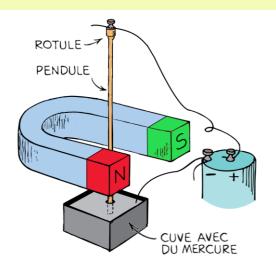
Remarques

- Un conducteur ne subit pas de force de Laplace :
 - o en l'absence de courant (I = 0)
 - o en l'absence de champ magnétique (B = 0)
 - o s'il est dirigé parallèlement au champ magnétique ($\alpha = 0$ ou $\alpha = 180^{\circ} \Rightarrow \sin \alpha = 0$)
- Un conducteur subit une force de Laplace maximale s'il est dirigé perpendiculairement au champ magnétique : $F_m = I \ \ell \ B \ \underbrace{\sin 90^\circ}_{} = I \ \ell \ B$
- Si le champ magnétique n'englobe pas la totalité du conducteur, la longueur ℓ se rapporte à la partie du conducteur qui est effectivement plongée dans le champ magnétique.

As-tu compris?

Le conducteur-pendule est mobile autour d'une rotule (voir figure).

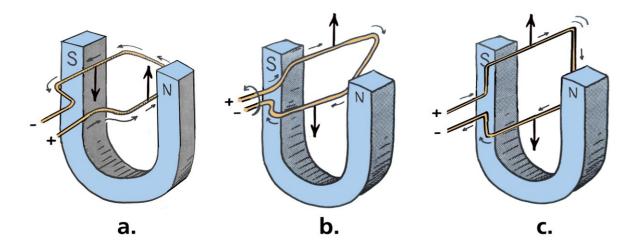
- a) Représenter la force de Laplace qui fait dévier le pendule.
- b) Que devient le sens de déviation du pendule si
 - les pôles de la batterie sont inversés ?
 - l'aimant est retourné ?
 - les pôles de la batterie sont inversés et l'aimant est retourné ?



5.6 Application technique : le moteur électrique à courant continu

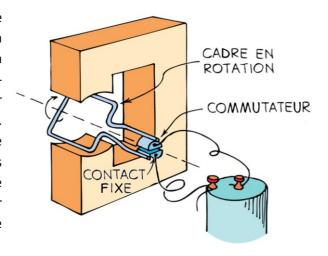
Un moteur électrique transforme de l'énergie électrique en énergie mécanique de rotation. Son principe de fonctionnement peut être expliqué à l'aide de la force de Laplace.

Considérons un cadre rectangulaire qui est plongé dans le champ magnétique d'un aimant en U:



- **a.** Lorsque le cadre est parcouru par un courant, il se met en rotation sous l'action d'un couple de forces de Laplace (flèches noires sur le schéma).
- **b.** L'accélération rotationnelle est plus petite parce que les bras de levier des forces sont plus petits.
- c. En position verticale, le couple de forces n'a plus d'effet de rotation car les droites d'action des forces passent par l'axe de rotation (point mort). Grâce à son inertie, le cadre dépasse la position verticale. Cependant, le couple de forces n'agit alors plus dans le bon sens et tend à inverser le sens de rotation du cadre. Après plusieurs oscillations autour de la position verticale, le cadre finit par s'immobiliser dans la position verticale.

Pour entretenir la rotation, il faut donc inverser le sens du courant lorsque le cadre passe par la position verticale. À cet effet, on utilise un commutateur. Il est constitué par deux demicylindres métalliques (collecteurs), séparés par un isolant, qui sont fixés aux bornes du cadre. Lorsque le cadre tourne solidairement avec le commutateur, les collecteurs frottent contre des contacts fixes (balais) ayant chacun une polarité donnée. Le système balais et commutateur assure ainsi que le sens du courant soit permuté après chaque demi-tour.

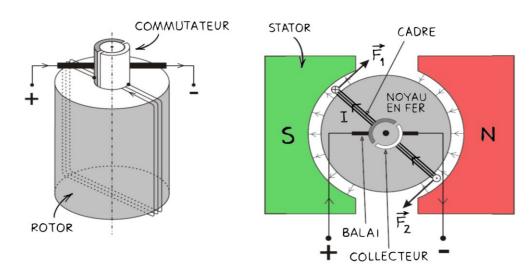


L'applet suivant illustre le fonctionnement du moteur électrique : https://www.walter-fendt.de/html5/phfr/electricmotor-fr.htm

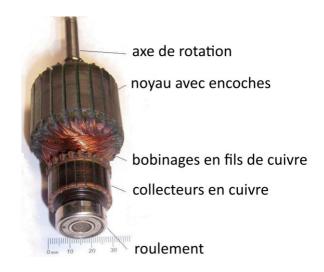
De façon générale, tout moteur électrique comprend un **stator** (partie fixe) qui crée un champ magnétique dans lequel tourne le **rotor** (partie mobile).

Réalisation pratique

Afin d'augmenter l'effet de rotation de la force magnétique, un moteur réel ne possède pas seulement une spire de courant mais une multitude. Dans le rotor inventé par Werner von Siemens en 1856, le noyau de fer cylindrique assure que le champ magnétique est radial, de sorte que l'effet de rotation du couple de forces de Laplace \vec{F}_1 et \vec{F}_2 est toujours maximal.



Un inconvénient de ce moteur est qu'il possède deux points morts (deux positions verticales de la bobine plate sur un tour). Afin d'y remédier, on peut utiliser plusieurs bobinages décalés angulairement les uns des autres de manière régulière autour de l'axe de rotation. Le commutateur dispose alors d'une paire de collecteurs distincte pour chacun des bobinages.



Remarques

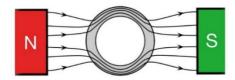
- L'aimant permanent du stator peut être remplacé par un ou plusieurs électroaimants.
- Il existe des moteurs électriques à courant continu sans commutateur et balais (« brushless DC motor »). Le champ magnétique du stator doit alors être réglé électroniquement pour assurer la rotation du rotor. Le rotor peut dans ce cas aussi être réalisé à l'aide d'un ou plusieurs aimants permanents.

À part le moteur électrique à courant continu, il existe également le moteur électrique à courant alternatif. Un avantage en est qu'il n'a pas besoin de commutateur et de balais.

6 Pour en savoir plus

Écrantage d'un champ magnétique

Si on introduit un anneau de fer épais dans un champ magnétique, les lignes de champ magnétique restent confinées à l'intérieur de l'anneau et contournent l'intérieur de l'anneau.



Cet écrantage magnétique est utilisé pour maintenir le champ magnétique terrestre à l'écart de matériel expérimental très sensible, de sorte à pouvoir exclure des erreurs de mesure lors de la détermination d'intensités de champs magnétiques.

L'écrantage magnétique a un effet néfaste lorsqu'on souhaite utiliser une boussole. Lorsque les voiliers en bois furent remplacés par des navires en fer, la boussole à aiguille magnétique a dû être remplacée par les gyrocompas mécaniques, dont la conception est nettement plus sophistiquée.

Source du champ magnétique terrestre

Bien que le spectre magnétique de la Terre soit semblable à celui d'un énorme aimant droit placé au centre de la Terre, il ne peut pas en être ainsi. En effet, la température y est simplement trop élevée (au-dessus de la température de Curie). Le champ magnétique terrestre est probablement créé par des courants électriques à l'intérieur de la Terre. Sous le manteau rocheux extérieur se trouve une partie

de fer fondu qui entoure le noyau solide de la Terre. Un déplacement de charges électriques en boucles dans cette partie liquide pourrait être la source du champ magnétique terrestre. Ce déplacement de charges pourrait résulter de **courants de convection**, provoqués par la température élevée du noyau central, dans cette partie liquide à l'intérieur de la Terre. Ces courants de convection, combinés aux effets de rotation de la Terre produiraient un déplacement de charges. En raison de la grande taille de la Terre, il suffit que la vitesse de déplacement des charges soit d'environ un millimètre par seconde pour créer le champ magnétique terrestre actuel.



Inversion du champ magnétique terrestre

Le champ magnétique terrestre n'est pas stable. Des analyses magnétiques des couches rocheuses ont révélé que le champ magnétique terrestre a fluctué tout au long de l'histoire géologique. Les domaines magnétiques dans le fer fondu sont désorientés en raison de l'agitation thermique, mais ont cependant une légère tendance à s'aligner selon



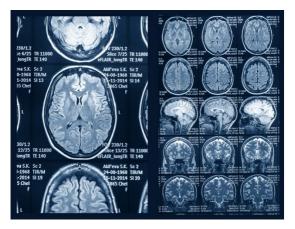
le champ magnétique terrestre. Après le refroidissement et la solidification du fer, cette orientation persiste dans le fer de la roche. Ces traces dans les couches rocheuses montrent qu'il y a eu des périodes pendant lesquelles l'intensité du champ magnétique de la Terre a diminué à zéro, suivi d'une inversion des pôles magnétiques. Plus de 20 inversions ont eu lieu au cours des 5 derniers millions d'années. La plus récente a eu lieu il y a près de 700000 ans. Les inversions antérieures se sont produites il y a 870000 et 950000 ans. On ne peut pas prédire quand la prochaine inversion des pôles aura lieu car les séquences d'inversion ne sont pas régulières. Cependant, des mesures récentes

montrent une diminution de plus de 5% de l'intensité du champ magnétique terrestre au cours des 100 dernières années. Si cette évolution se poursuit, nous pourrions bien connaître une nouvelle inversion d'ici 2000 ans. L'inversion des pôles magnétiques n'est pas propre à la Terre. Le champ magnétique du Soleil s'inverse régulièrement, avec une période de 22 ans.

Applications des électroaimants

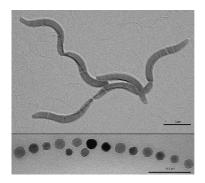
Les électroaimants font partie de notre vie quotidienne, que ce soit dans les systèmes sonores ou toutes sortes de moteurs électriques (contenus dans à peu près tous les engins qui tournent). En voici quelques applications techniques :

- Dans les dépotoirs, des électroaimants puissants sont utilisés pour soulever des déchets ferromagnétiques.
- Dans les trains *Maglev* (trains à lévitation magnétique), la lévitation du train est accomplie par des électroaimants situés le long du rail. Ces électroaimants repoussent les gros aimants permanents fixés en bas du train. Une fois que le train lévite de quelques centimètres au-dessus du rail, un courant alternatif circule à travers d'autres électroaimants fixés sur les bords du rail. La polarité magnétique de ces électroaimants alterne. Des poussées et tractions alternées propulsent le train vers l'avant. À l'aide de la lévitation, le frottement sur les rails subi par les trains conventionnels est éliminé. Les vitesses des trains *Maglev* ne sont limitées que par la résistance de l'air et le confort des passagers.
- Dans les accélérateurs de particules :
- Les électroaimants les plus puissants utilisent des bobines supraconductrices, à travers lesquelles d'énormes courants électriques circulent sans aucune résistance électrique, et donc sans perte d'énergie sous forme d'énergie thermique. Les électroaimants qui utilisent des bobines supraconductrices produisent des champs magnétiques extrêmement puissants (bien que beaucoup d'énergie soit nécessaire pour maintenir les supraconducteurs à une température très froide). Dans le « Large Hadron Collider (LHC) » au CERN à Genève, des aimants supraconducteurs guident des particules de haute énergie dans un tunnel d'un accélérateur ayant une circonférence de 27 km.
- Les aimants supraconducteurs sont également utilisés dans les appareils d'imagerie par résonance magnétique (IRM) dans les hôpitaux. En effet, on a besoin d'un champ magnétique d'une grande puissance et stable, afin de créer une magnétisation des tissus grâce à l'alignement des moments magnétiques de spin.
 - De cette façon l'IRM nous permet d'avoir, de façon non invasive, des images en deux ou en trois dimensions de l'intérieur du corps humain.



Biomagnétisme

Les bactéries magnétotactiques sont des procaryotes aquatiques qui ne peuvent pas distinguer le haut et le bas à l'aide de la gravitation. En revanche, elles ont la particularité de biosynthétiser des cristaux intracellulaires constitués de magnétite. Ces nanocristaux s'alignent en chaînes dans le cytoplasme de la bactérie pour former de minuscules boussoles, appelées magnétosomes. Ils utilisent ensuite ces magnétosomes pour détecter l'inclinaison du champ magnétique terrestre. Doté de ce sens d'orientation, ces organismes sont ainsi capables de se déplacer le long des lignes de champ magnétique.



Ces bactéries ne sont pas les seuls organismes avec un sens magnétique. Les pigeons ont des boussoles naturelles dans leur crâne qui sont reliés par un grand nombre de nerfs au cerveau du pigeon. Les pigeons peuvent non seulement discerner les directions longitudinales le long du champ magnétique, mais ils peuvent également détecter la latitude par l'inclinaison du champ magnétique terrestre.

Les abeilles, les guêpes, les papillons monarques, les tortues de mer et les poissons rejoignent le groupe de créatures dotées d'un sens magnétique. Des cristaux de magnétite qui ressemblent à ceux trouvés dans les bactéries magnétotactiques ont même été détectés dans le cerveau humain.

Ceintures Van Allen

Certaines particules du rayonnement cosmique sont piégées dans le champ magnétique en faisant des allers-retours entre les pôles magnétiques de la Terre. Elles forment les ceintures de Van Allen³, constituées de deux anneaux en forme de beignet. L'anneau intérieur est centré à une altitude d'environ 3200 km au-dessus de la surface terrestre; l'anneau extérieur, plus grand



et plus large, est centré à une altitude d'environ 16000 km. La plupart des particules chargées piégées dans la ceinture externe proviennent du vent solaire. Les particules piégées dans la ceinture intérieure proviennent en majeure partie de l'atmosphère terrestre. Leur nombre a augmenté à cause des nombreux tests de bombes à hydrogène réalisés en haute altitude.

Malgré le champ magnétique terrestre, de nombreux rayons cosmiques « secondaires » atteignent la surface de la Terre. Ce sont des particules créées lors des collisions des particules du rayonnement cosmique primaire avec les noyaux atomiques de la haute atmosphère. Le bombardement par le rayonnement cosmique est le plus intense aux pôles magnétiques car les particules chargées qui frappent la Terre ne traversent pas les lignes de champ magnétique, mais se déplacent le long des lignes de champ et ne sont donc pas déviées. Le rayonnement

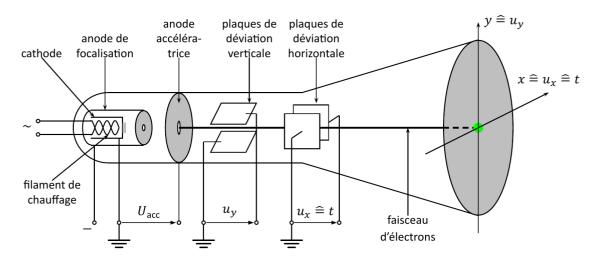


cosmique est le moins intense dans les régions équatoriales. Aux latitudes moyennes, environ cinq particules frappent chaque centimètre carré chaque minute au niveau de la mer; ce nombre augmente rapidement avec l'altitude. Les rayons cosmiques pénètrent donc dans ton corps pendant que tu lis ce cours - et même lorsque tu ne le lis pas.

³ Nommées en l'honneur de James Van Allen qui a suggéré leur existence à partir des données recueillies par le satellite américain Explorer I en 1958.

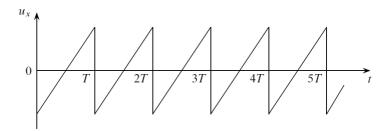
Oscilloscope analogue

Les oscilloscopes servent à visualiser l'évolution d'une tension électrique au cours du temps. Les oscilloscopes analogues comprennent un tube cathodique (voir section 1.4) dont le faisceau est dévié à l'aide de champs électriques :



Entre les plaques de déviation verticale on applique la tension à analyser u_y . La déviation est d'autant plus forte que la tension s'écarte de zéro. L'ordonnée y du spot correspond donc à u_y .

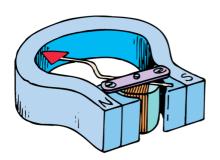
Entre les plaques de déviation horizontale on applique la tension de balayage ou base de temps u_{χ} . Il s'agit d'une tension en dents de scie qui augmente linéairement avec le temps t au cours d'une période T:



L'abscisse x du spot correspond donc au temps t.

Galvanomètre à cadre mobile

Le galvanomètre à cadre mobile est un type d'ampèremètre très sensible qui utilise la force de Laplace à la mesure de l'intensité de courant. Un cadre comportant plusieurs spires qui sont embobinées autour d'un noyau de fer cylindrique est mobile autour d'un axe de rotation. Lorsque le cadre, qui est placé dans l'entrefer d'un aimant permanent, est parcouru par un courant il commence à tourner sous l'effet d'un couple de forces de Laplace \vec{F}_1 et \vec{F}_2 . Un ressort spiral limite alors le mouvement en exerçant

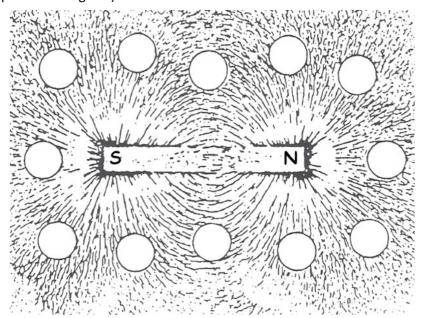


un couple de rappel qui devient d'autant plus grand que l'angle de déviation de l'aiguille est grand. Finalement, l'aiguille s'immobilise dans une position d'équilibre stable. La déviation de l'aiguille est d'autant plus grande que l'intensité I du courant est grande.

7 Exercices

Champ magnétique

- **1.** Laquelle des affirmations suivantes est fausse?
 - A. L'intensité du champ magnétique augmente lorsque les lignes de champ se rapprochent
 - B. L'intensité du champ magnétique reste constante lorsque les lignes de champ sont parallèles
 - C. L'intensité du champ magnétique diminue lorsque les lignes de champ s'écartent
 - D. L'intensité du champ magnétique diminue lorsque les lignes de champ se rapprochent
- 2. Le champ magnétique entre les branches d'un aimant en U est caractérisé par :
 - A. Uniquement une direction constante
 - B. Uniquement une intensité constante
 - C. Uniquement un sens constant
 - D. Une direction, un sens et une intensité constants
- **3.** La figure ci-dessous montre un aimant droit autour duquel on a saupoudré de la limaille de fer et disposé des boussoles. Représenter les aiguilles des boussoles par une flèche (la pointe de la flèche représente le pôle N de l'aiguille).

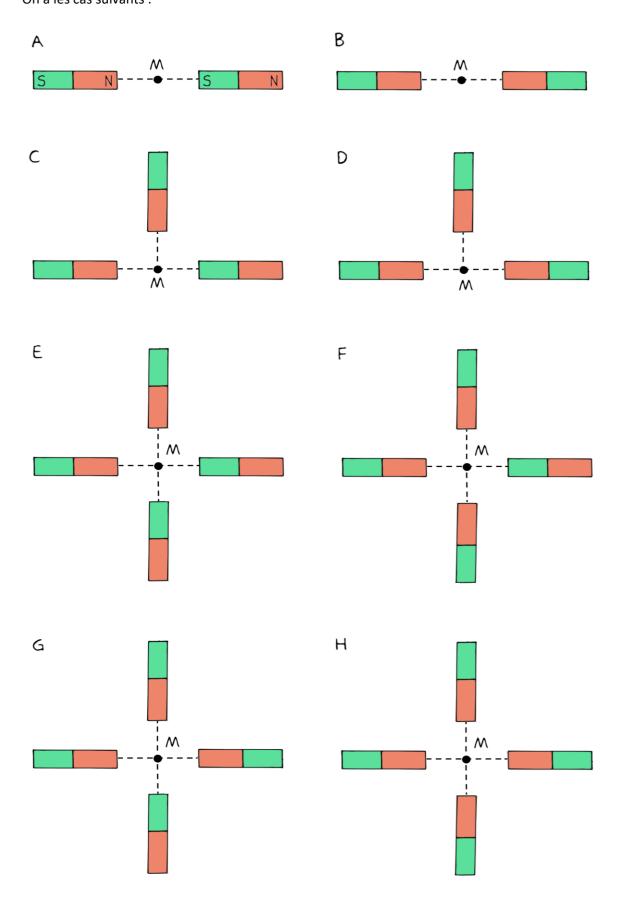


4. Tu disposes de deux barres de fer dont l'une est aimantée et l'autre ne l'est pas. Comment peuxtu déterminer quelle barre est aimantée si tu ne disposes d'aucun autre outil ?



- 5. On veut désaimanter un corps en fer. Laquelle des méthodes proposées est fausse ?
 - A. On peut le désaimanter à l'aide d'un champ magnétique.
 - B. On peut le désaimanter à l'aide d'un champ électrique.
 - C. On peut le désaimanter en le chauffant à une température assez élevée.
 - D. On peut le désaimanter en le frappant assez fortement contre un corps très dur.

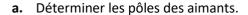
6. On suppose que tous les aimants sont identiques et que le point M est équidistant de tous les aimants. L'intensité du champ magnétique créé par un seul aimant en M vaut *B*. On a les cas suivants :



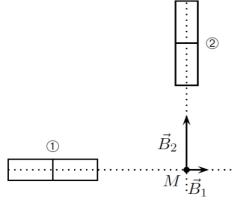
Indiquer pour quels cas l'affirmation concernant le vecteur champ magnétique résultant en M est correcte.

	Affirmation	Α	В	С	D	E	F	G	Н
1	Le champ magnétique est nul.								
2	La direction du champ magnétique est horizontale.								
3	La direction du champ magnétique est verticale.								
4	L'intensité du champ magnétique est égale à B.								
5	L'intensité du champ magnétique est égale à 2B.								
6	L'intensité du champ magnétique est égale à $\sqrt{5}B$.								
7	L'intensité du champ magnétique est égale à $2\sqrt{2}B$.								

7. En un point M de l'espace, on superpose deux champs magnétiques \vec{B}_1 et \vec{B}_2 qui sont créés par deux aimants droits 1 et 2 dont les axes sont perpendiculaires ; les intensités des champs valent $B_1=10~\mathrm{mT}$ et $B_2=30~\mathrm{mT}$.

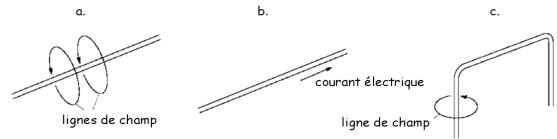


- **b.** Déterminer la direction prise par une aiguille aimantée placée au point M.
- **c.** Calculer l'intensité du champ magnétique résultant en *M*.

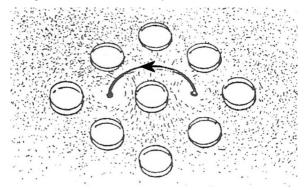


- 8. Oersted a découvert que l'électricité et le magnétisme sont deux domaines (liés) (indépendants).
- **9.** Quel(s) champ(s) de force entoure(nt) une charge électrique au repos ? Quel champ de force supplémentaire entoure la charge lorsque celle-ci est en mouvement ?
- **10.** Un faisceau de protons à haute énergie émerge d'un accélérateur de particules. Est-ce qu'un champ magnétique est associé à ces particules ? Justifier.
- **11.** Un câble parcouru par un courant électrique est orienté dans la direction Nord-Sud. Dans quelle direction une boussole placée en dessous du câble s'oriente-t-elle ?
- **12.** Un fil rectiligne est parcouru par un courant électrique et crée un champ magnétique dans son entourage.
- 13. Laquelle des affirmations est correctes ?
 - A. L'intensité du champ magnétique diminue si la distance au conducteur diminue
 - B. L'intensité du champ magnétique augmente si la distance au conducteur augmente
 - C. L'intensité du champ magnétique diminue si la distance au conducteur augmente
 - D. L'intensité du champ magnétique est indépendante de la distance au conducteur
- **14.** Un fil rectiligne est parcouru par un courant électrique. Que se passe-t-il avec les lignes de champ magnétique lorsque le sens du courant est inversé ?
- 15. Est-ce que le champ magnétique créé par une spire de courant est-il uniforme ? Justifier.

16. Déterminer dans les 3 cas ci—dessous, soit le sens du courant électrique soit le sens des lignes de champ magnétique tout au long du conducteur.



17. La figure ci-dessous montre une spire traversant un plan et parcourue par un courant électrique (sens indiqué par la flèche) autour de laquelle on a saupoudré de la limaille de fer et disposé des boussoles. Représenter les aiguilles des boussoles par une flèche.



- **18.** On branche un solénoïde aux bornes d'un générateur. Laquelle des affirmations est fausse pour le champ magnétique à l'intérieur du solénoïde :
 - A. Le champ magnétique \vec{B} est constant
 - B. Les lignes de champ sont parallèles
 - C. L'intensité du champ magnétique est proportionnelle à l'intensité du courant *I* traversant le solénoïde
 - D. L'intensité du champ magnétique est proportionnelle au nombre de spires du solénoïde
 - E. L'intensité du champ magnétique est proportionnelle à la longueur du solénoïde
 - F. L'intensité du champ magnétique est proportionnelle au nombre de spires par unité de longueur du solénoïde
- **19.** On branche un solénoïde aux bornes d'un générateur. On veut ensuite augmenter l'intensité du champ magnétique créé par le solénoïde.

Laquelle des propositions suivantes est fausse?

- A. On peut augmenter l'intensité du courant à travers le solénoïde
- B. On peut augmenter seulement la longueur du solénoïde
- C. On peut augmenter seulement le nombre de spires du solénoïde
- D. On peut augmenter le nombre de spires par unité de longueur du solénoïde
- E. On peut insérer un noyau de fer à l'intérieur du solénoïde
- 20. Que devient l'intensité du champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde lorsque qu'on :
 - a. double sa longueur tout en assurant que la densité des spires reste la même ?
 - **b.** diminue le rayon du solénoïde de moitié sans changer d'autres paramètres ?
 - c. rembobine le fil conducteur du solénoïde de façon homogène sur la moitié de sa longueur ?
 - d. introduit un noyau de fer dans le solénoïde?

- 21. Un ressort à spires non jointives est suspendu verticalement. Lorsqu'on le fait parcourir par un courant continue ses spires vont-elles a) s'éloigner b) s'approcher ou c) rester immobiles ? Justifier.
- **22.** Deux solénoïdes 1 et 2 sont parcourus par des courants d'intensité I_1 et I_2 . Le solénoïde 1 possède 100 spires et a une longueur de 6 cm. Le solénoïde 2 possède 200 spires et a une longueur de 10 cm. Afin que le champ magnétique créé à l'intérieur des deux solénoïdes soit identique, il faut que $\frac{I_1}{I_2}$ soit égal à :
 - A. $\frac{3}{10}$ B. $\frac{5}{6}$
- C. 1

- 23. Une bobine, de longueur 20 cm et ayant 1000 spires par unité de longueur, est traversée par un courant électrique d'intensité 100 mA. Quelle est l'intensité du champ magnétique à l'intérieur de la bobine?
 - A. 126 mT
- B. 628 mT
- C. 126 µT
- D. 628 μT
- E. 126 nT
- F. 628 nT
- 24. Un solénoïde de longueur de 32 cm comporte 1400 spires. L'axe du solénoïde est perpendiculaire au méridien magnétique. On place en son centre une aiguille aimantée mobile autour d'un axe vertical. Lorsque le solénoïde est parcouru par un courant électrique, l'aiguille est déviée d'un angle de 42 $^{\circ}$.
 - a. Sachant que la composante horizontale du champ magnétique terrestre vaut $20~\mu T$, calculer l'intensité du courant en mA.
 - b. Déterminer, en justifiant, l'angle dont l'aiguille va tourner si le sens du courant dans la bobine est brutalement inversé.
- **25.** Un aimant droit crée en un point *P* à l'intérieur d'un solénoïde de 140 spires et de longueur 16 cm un champ magnétique de valeur 2,5 mT. Déterminer le sens et l'intensité du courant électrique qui va annuler le champ magnétique en P.

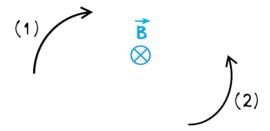




26. Lorsqu'un noyau de fer est introduit dans un électroaimant, le champ magnétique à l'intérieur de l'électroaimant est intensifié. Expliquer à l'aide du modèle microscopique.

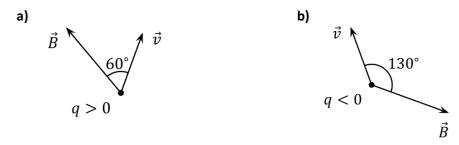
Force de Lorentz

27. On observe les trajectoires suivantes pour des particules chargées dans un champ magnétique \vec{B} uniforme.



Déterminer le signe de la charge pour chacune des deux particules.

28. Déterminer dans les cas suivants la direction, le sens et la norme de la force de Lorentz, sachant que $v=20\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}$, $B=300~\mathrm{mT}$ et |q|=2e:



- **29.** Vrai ou faux ? Motiver votre réponse.
 - **a.** La trajectoire d'une particule chargée est toujours circulaire dans un champ magnétique uniforme.
 - **b.** La force de Lorentz est toujours perpendiculaire au champ magnétique.
 - c. L'accélération d'une particule chargée dans un champ magnétique est toujours nulle.
 - d. Le travail de la force magnétique est toujours nul.
 - e. Un électron et un proton se déplaçant avec la même vitesse \vec{v} , dans un champ magnétique constant, subissent une force de Lorentz de même intensité.
- **30.** Comment doit se déplacer une particule chargée dans un champ magnétique uniforme, afin que l'intensité de la force magnétique soit maximale. Expliquer.
- **31.** Un électron peut-il se déplacer sans être dévié dans une portion de l'espace où règne un champ magnétique \vec{B} ? Expliquer.
- **32.** Une particule chargée se déplace dans un champ magnétique uniforme et subit une force magnétique \vec{F}_m . Laquelle des affirmations est fausse ?
 - A. L'intensité de la force magnétique double si on double la charge de la particule
 - B. L'intensité de la force magnétique double si on double la vitesse de la particule
 - C. L'intensité de la force magnétique double si on double l'intensité du champ magnétique
 - D. L'intensité de la force magnétique double si on double l'angle entre le vecteur vitesse et le vecteur champ magnétique

- **33.** Une particule chargée positivement subit une force magnétique \vec{F}_m et est déviée dans un champ magnétique \vec{B} uniforme. Laquelle des affirmations est fausse.
 - A. La direction de \vec{F}_m ne change pas si la particule est chargée négativement
 - B. L'intensité de la force magnétique dépend de l'angle entre \vec{B} et \vec{v}
 - C. La force magnétique \vec{F}_m est perpendiculaire au plan formé par \vec{B} et \vec{v}
 - D. La force magnétique \vec{F}_m peut être colinéaire à \vec{v}
 - E. Le mouvement de la particule chargée est uniforme
- **34.** On suppose placer un électron au repos à l'intérieur d'un champ magnétique uniforme. Laquelle des affirmations est correcte ?
 - A. L'électron va rester au repos
 - B. L'électron va subir une force et aura un mouvement rectiligne uniformément accéléré
 - C. L'électron va se mettre en mouvement et aura ensuite un mouvement uniforme
 - D. Selon l'orientation du champ magnétique, l'électron va rester au repos ou va se mettre en mouvement
- **35.** Un électron est dévié en passant dans une certaine portion de l'espace. Peut-on affirmer qu'il existe obligatoirement un champ magnétique \vec{B} dans cette portion de l'espace ? Expliquer.
- **36.** Peut-on dévier un neutron à l'aide d'un champ magnétique ? Expliquer.
- **37.** Peut-on accélérer un proton à partir du repos à l'aide d'un champ **a)** électrique ; **b)** magnétique ? Expliquer.
- **38.** Un proton et un électron pénètrent avec la même vitesse \vec{v} dans un champ magnétique uniforme \vec{B} qui est perpendiculaire à \vec{v} . Laquelle des affirmations est correcte ?
 - A. Aucune des particule ne subit de force magnétique
 - B. La force magnétique subie par le proton est plus grande que celle subie par l'électron
 - C. La force magnétique subie par le proton a même intensité que celle subie par l'électron
 - D. La force magnétique subie par le proton est plus petite que celle subie par l'électron
- **39.** Une particule α se déplace avec une vitesse $v=2.0\cdot 10^6\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ dans un champ magnétique d'intensité $200\,\mathrm{mT}$ et perpendiculaire au vecteur vitesse. Comparer la force magnétique et le poids subis par la particule α . Conclure.
- **40.** Un proton pénètre avec une vitesse \vec{v} d'intensité $2,0\cdot 10^6$ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ horizontalement dans une région de l'espace où règne un champ magnétique \vec{B} uniforme perpendiculaire à \vec{v} . Il subit alors une force \vec{F} d'intensité $5,0\cdot 10^{-14}$ N et est dévié vers le haut.
 - a. Quel est la trajectoire du proton dans cette portion de l'espace.
 - **b.** Faites une figure de la situation et indiquer les vecteurs \vec{v} et \vec{F} , ainsi que la trajectoire du proton.
 - **c.** Déterminer les caractéristiques du champ magnétique \vec{B} .
 - **d.** Comment varie le rayon de la trajectoire du proton si on augmente l'intensité du champ magnétique ? Expliquer.

41. Un électron et un proton pénètrent avec la même vitesse \vec{v} dans une région de l'espace où règne un champ magnétique uniforme \vec{B} .



- a. Vers où est dévié l'électron, respectivement le proton ? Expliquer.
- **b.** Quelle est la trajectoire du mouvement de chacune des deux charges ?
- c. Comparer l'intensité des forces subies par les deux charges. Expliquer.
- d. Comparer l'accélération des particules chargées. Expliquer.
- **42.** Un proton et une particule α pénètrent avec la même vitesse \vec{v} dans une région de l'espace où règne un champ magnétique uniforme \vec{B} .



- **a.** Vers où est dévié le proton, respectivement la particule α ? Expliquer.
- b. Quelle est la trajectoire du mouvement de chacune des deux charges ?
- c. Comparer l'intensité des forces subies par les deux charges. Expliquer.
- d. Comparer l'accélération des particules chargées. Expliquer.
- **43.** Un électron et un proton pénètrent avec la même vitesse \vec{v} dans une région de l'espace où règne un champ magnétique uniforme \vec{B} de sorte que le vecteur vitesse soit colinéaire au vecteur champ magnétique.
 - a. Vers où est dévié l'électron, respectivement le proton ? Expliquer.
 - **b.** Quelle est la trajectoire du mouvement de chacune des deux charges ?
 - c. Comparer l'intensité des forces subies par les deux charges. Expliquer.
- 44. Le travail de la force magnétique d'une particule chargée en mouvement dans un champ magnétique uniforme est :
 - A. Toujours négatif
 - B. Toujours nul
 - C. Toujours positif
 - D. Peut être positif ou négatif suivant l'orientation du champ magnétique
- **45.** Deux particules différentes positives de charges q_1 et q_2 se déplacent dans un champ magnétique uniforme \vec{B} dont les lignes de champ sont perpendiculaires aux deux vecteurs vitesse. Elles subissent alors une force magnétique identique.

Laquelle des relations est correcte?

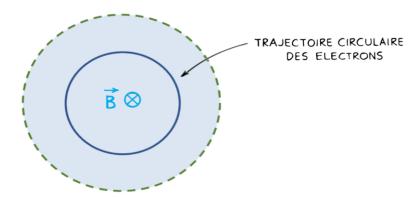
A.
$$v_2 = \frac{q_1 \cdot v_1}{q_2}$$

B.
$$v_2 = \frac{q_2 \cdot v_1}{q_1}$$

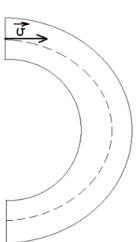
C.
$$v_2 = \frac{q_1}{q_2 \cdot v_1}$$

A.
$$v_2 = \frac{q_1 \cdot v_1}{q_2}$$
 B. $v_2 = \frac{q_2 \cdot v_1}{q_1}$ C. $v_2 = \frac{q_1}{q_2 \cdot v_1}$ D. $v_2 = \frac{q_2}{q_1 \cdot v_1}$

46. Les électrons d'un faisceau ont tous acquis la même vitesse sous l'effet d'une tension accélératrice *U*. Ils entrent alors dans une zone de champ magnétique uniforme tel qu'indiqué dans la figure ci-dessous.

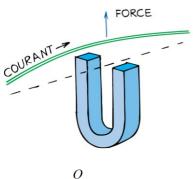


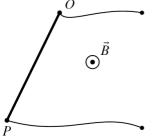
- a. Quel est le sens de rotation des électrons ? Expliquer.
- **b.** Calculer l'intensité de la force subie par les électrons, si on suppose que l'intensité du champ magnétique vaut 10 mT et que la tension accélératrice vaut 100 V.
- **47.** La figure ci-contre montre la partie semi-circulaire d'un spectromètre de masse dans lequel des cations issus d'atomes de fer rentrent avec une vitesse v. À l'aide d'un champ magnétique uniforme \vec{B} , ils sont déviés afin de suivre la trajectoire indiquée en pointillée.
 - a) Préciser la direction et le sens du champ magnétique \vec{B} dans la partie semi-circulaire.
 - **b)** Sachant que l'intensité du champ magnétique vaut B=2 mT, que la vitesse des ions vaut $v=5\cdot 10^4\frac{\rm m}{\rm s}$ et que l'intensité de la force de Lorentz vaut $F_m=4$, $806\cdot 10^{-17}$ N, trouver la charge des ions ainsi que leur notation chimique.



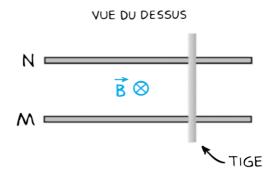
Force de Laplace

- 48. Considérer la figure ci-contre.
 - a) Pourquoi le fil électrique subit une force?
 - b) Indiquer sur le dessin le sens du champ magnétique de l'aimant.
 - c) Comment se serait déplacé le fil électrique si l'on avait inversé le sens du courant ou celui du champ magnétique?
- **49.** Un conducteur-pendule OP, pivotable en O, est plongé dans un champ magnétique uniforme \vec{B} . Lorsqu'il est traversé par un courant électrique il s'incline par rapport à la verticale comme montré sur la figure ci-contre.
 - a) Représenter sur une figure les forces qui agissent sur le conducteur.
 - b) Déterminer le sens du courant électrique.

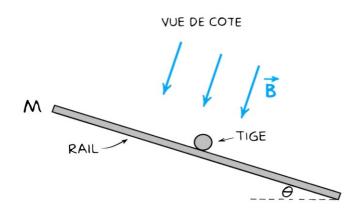




50. Une tige en aluminium de longueur $l=20\,\mathrm{cm}$ et de masse $m=60\,\mathrm{g}$ repose sur deux rails conducteurs distants de MN = 15 cm et disposés dans un plan horizontal. La tige peut se déplacer sans frottement le long de ces deux rails. Le dispositif est placé dans un champ magnétique uniforme d'intensité $B=0.3\,\mathrm{T}$. On branche un générateur de courant continu à ce dispositif : le pôle positif en N, le pôle négatif en M.



- a. Expliquer pourquoi le conducteur se met en mouvement et déterminer le sens de son déplacement. Représenter la force magnétique exercée sur la tige et calculer sa valeur si l'intensité du courant vaut $10\ A$.
- **b.** Calculer l'accélération de la tige en aluminium.
- c. Que se passe-t-il si on inverse le sens courant électrique ?
- d. Que se passe-t-il si on inverse les pôles de l'aimant ?
- **51.** On incline les deux rails et le champ magnétique de l'exercice précédent d'un angle $\theta=15^\circ$ par rapport au plan horizontal. La tige en aluminium reste immobile lorsqu'un courant d'intensité I la traverse.



- **a.** Énumérer et représenter les forces extérieures s'appliquant sur la tige, lorsque celle-ci reste immobile.
- **b.** Écrire la relation reliant les forces extérieures et calculer l'intensité de la force de Laplace.
- **c.** Calculer l'intensité du courant *I* traversant la tige et préciser son sens.
- d. On divise l'intensité du courant par deux.
 - Quel est alors le mouvement de la tige ? Expliquer.
 - Déterminer l'accélération de la tige.

Révision

A. Les affirmations suivantes sont-elles vraies ou fausses?

	Affirmation	Vrai	Faux
1	Le champ magnétique est une grandeur vectorielle.		
2	La direction du champ magnétique en un point de l'espace est tangente à la ligne de champ en ce point.		
3	Le champ magnétique $ec{B}$ est constant dans l'entrefer d'un aimant en U.		
4	L'intensité du champ magnétique créé par un conducteur rectiligne traversé par un courant électrique diminue si la distance au conducteur diminue.		
5	L'intensité du champ magnétique B à l'intérieur d'un solénoïde est proportionnelle à l'intensité du courant I traversant le solénoïde.		
6	L'intensité du champ magnétique B à l'intérieur d'un solénoïde augmente si on double le nombre de spires du solénoïde ainsi que sa longueur.		
7	Une aiguille aimantée se trouvant à proximité d'un fil conducteur subit une force dès qu'un courant circule à travers le fil.		
8	La force de Lorentz est toujours perpendiculaire au vecteur champ magnétique.		
9	La trajectoire d'une particule chargée est toujours circulaire, lorsqu'elle se déplace dans un champ magnétique uniforme.		
10	dans un champ magnétique uniforme.		
11			
12	Il est possible de dévier un neutron à l'aide d'un champ magnétique.		
13	Il est possible de mettre un proton en mouvement à l'aide d'un champ magnétique.		
14	Un fil rectiligne conducteur parcouru par un courant électrique est soumis à une force magnétique, s'il est placé dans un champ magnétiq parallèle au sens du courant.		

B. Un proton pénètre avec une vitesse \vec{v} dans un champ magnétique uniforme \vec{B} qui est perpendiculaire à \vec{v} . Les affirmations suivantes sont-elles vraies ou fausses ?

	Affirmation	Vrai	Faux
1	Le proton est dévié.		
2	La vitesse du proton augmente.		
3	Le proton subit une accélération $ec{a}$.		
4	La trajectoire du proton est circulaire.		
5	L'énergie cinétique du proton ne varie pas.		
6	La vitesse du proton augmente, si on augmente l'intensité du champ magnétique.		
7	La vitesse du proton varie, si on change la direction du champ magnétique.		
8	La force magnétique subie par le proton augmente, si on augmente l'intensité du champ magnétique.		
9	La force magnétique subie par le proton varie, si on change la direction du champ magnétique.		
10	L'intensité de l'accélération du proton double, si on double l'intensité du champ magnétique.		

C. Les affirmations suivantes sont-elles valables pour un champ électrique, pour un champ magnétique ou pour les deux ?

	Affirmation	Champ $\overrightarrow{\pmb{E}}$	Champ \overrightarrow{B}
1	On peut accélérer un proton à partir du repos.		
2	On peut dévier une particule en mouvement.		
3	L'intensité de la force subie par un proton dépend de la direction du champ.		
4	On peut accélérer linéairement un électron.		
5	La force subie par un électron est de sens opposé à celle subie par un proton.		
6	L'intensité de la force subie par un électron dépend de sa vitesse.		
7	L'énergie cinétique d'une particule chargée reste constante.		
8	La force subie par un neutron est nulle.		

Crédits Photos

- © Henri Weyer p.0 (page titre)
- © MarcelClemens / Shutterstock.com (153723227) p.1 (magnétite, 1ère photo)
- © Wikimedia Commons / domaine public) p.1 (boussole, 2^e photo)
- © LMWH/ Shutterstock.com (1415005892) **p.1** (aimants néodyme, 3^e photo)
- © imagedb.com/ Shutterstock.com (155677004) **p.4** (champ magnétique aimant droit)
- © Wikimedia Commons / Frank Eugene Austen (1916) **p.5** (champ magnétique aimant en U ; domaine public)
- © Richard Megna / FUNDAMENTAL PHOTOGRAPHS, NYC **p.11** (champs magnétiques)
- © Denis Belitsky / Shutterstock.com (1579360606) p.17 (aurore polaire)
- © Wikimedia Commons / Ulfbastel p.22 (rotor réel ; domaine public)
- © Akifyeva S / Shutterstock.com (1659663457) **p.24** (IRM)
- © Wikimedia Commons / Caulobacter subvibrioides **p.25** (magnetospirillum ; sous licence CC BY-SA 3.0)

Crédits Illustrations

- © Peter Hermes Furian / Shutterstock.com (1933879130) **p.6** (nord magnétique)
- © Wikimedia Commons / Ansgar Hellwig p.11 (bobines de Helmholtz ; sous licence CC BY-SA 2.0)

Des remerciements particuliers sont adressés à Paul G. HEWITT. Les illustrations sont, sauf indication contraire, l'œuvre de Paul G. Hewitt et des auteurs du cours. Les illustrations de Paul G. HEWITT ont été retravaillées par Laurent HILD, avec l'autorisation écrite et personnelle de l'auteur. Les illustrations originales sont des livres :

- © HEWITT, Paul G., Conceptual physics, 2015, Pearson
- © HEWITT, Paul G., Suchocki John, Conceptual physical science Practice Book, 2012, Pearson
- © EPSTEIN Lewis C., HEWITT, Paul G., Thinking Physics 1981, Insight Press