

Chapitre 7

Électromagnétisme

7.1 Magnétisme

7.1.1 Aimants

Les aimants furent découverts d'abord en Chine et puis en Grèce. Les premiers aimants sont des pierres noires qui ont la propriété d'attirer des objets en fer. Cette pierre est constituée de *magnétite*, un minerai de fer composé principalement d'oxyde de fer (Fe_3O_4). Le phénomène observé est le *magnétisme*.

Au voisinage d'un aimant, les corps en fer s'aimantent et deviennent eux-mêmes des aimants. Ceci est observé pour d'autres matériaux comme le nickel et le cobalt. Certains de ces matériaux dits *ferromagnétiques* ne se désaimantent pas si on éloigne l'aimant ; on a ainsi réalisé un *aimant permanent*.

Une des premières applications fut la *boussole*. Elle est constituée d'une aiguille aimantée mobile autour d'un axe vertical. En un lieu donné, l'aiguille s'oriente toujours dans la même direction et dans le même sens. Cette propriété fait de la boussole un instrument de navigation.

Un aimant permanent est capable d'attirer des corps ferromagnétiques. L'intensité de la force attractive diminue rapidement lorsqu'on éloigne le corps de l'aimant. La force est particulièrement intense aux extrémités de l'aimant appelées *pôles magnétiques*.

En étudiant les interactions entre deux barres aimantées, on constate qu'il y a des forces attractives et répulsives. On en conclut qu'il y a deux types de pôles différents.

Lorsqu'on suspend une barre aimantée, elle s'oriente dans une direction proche de la direction Nord-Sud géographique. L'extrémité de la barre qui pointe vers le Nord est appelée *pôle nord* et l'autre extrémité *pôle sud*.

Des expériences simples permettent de montrer que deux pôles de même nom se repoussent et que deux pôles de noms différents s'attirent.

Les pôles magnétiques apparaissent toujours par paires ; il n'existe pas de monopôle magnétique. En découpant une barre aimantée en deux, on obtient deux couples de pôles nord et sud (figure 7.1).

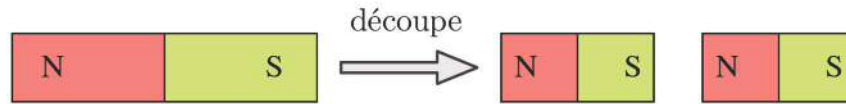


FIGURE 7.1 – Les pôles magnétiques apparaissent toujours par paires

Remarque : par convention, le pôle nord est marqué en rouge ou représenté par une flèche.

7.1.2 Notion de Champ magnétique

L'étude des interactions magnétiques est simplifiée par l'introduction de la notion de champ magnétique.

Expérience 7.1 Approchons plusieurs aiguilles aimantées d'un aimant droit (figure 7.2).

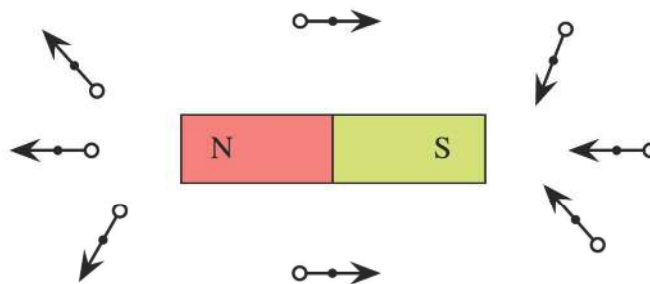


FIGURE 7.2 – Aiguilles aimantées placées au voisinage d'un aimant droit

Observations :

- Lorsque nous approchons les aiguilles de l'aimant, leurs orientations changent.
- Les aiguilles prennent chacune des directions et des sens bien déterminés, différents d'une aiguille à une autre.

Interprétation :

Les aiguilles subissent les forces magnétiques exercées par l'aimant droit. Ces forces sont différentes d'un point de l'espace à l'autre et conduisent à des orientations différentes des aiguilles. Nous disons que l'aimant droit crée un *champ magnétique*.

Définition *Un champ magnétique règne dans une région de l'espace si dans cette région une aiguille aimantée est soumise à des forces magnétiques.*

L'expérience précédente incite à représenter le champ en un point par une grandeur vectorielle.

Définition *En chaque point de l'espace, le champ magnétique est représenté par un vecteur champ magnétique \vec{B} dont les propriétés sont :*

direction	<i>l'axe de l'aiguille aimantée ;</i>
sens	<i>du pôle sud vers le pôle nord de l'aiguille ;</i>
valeur	<i>notée B.</i>

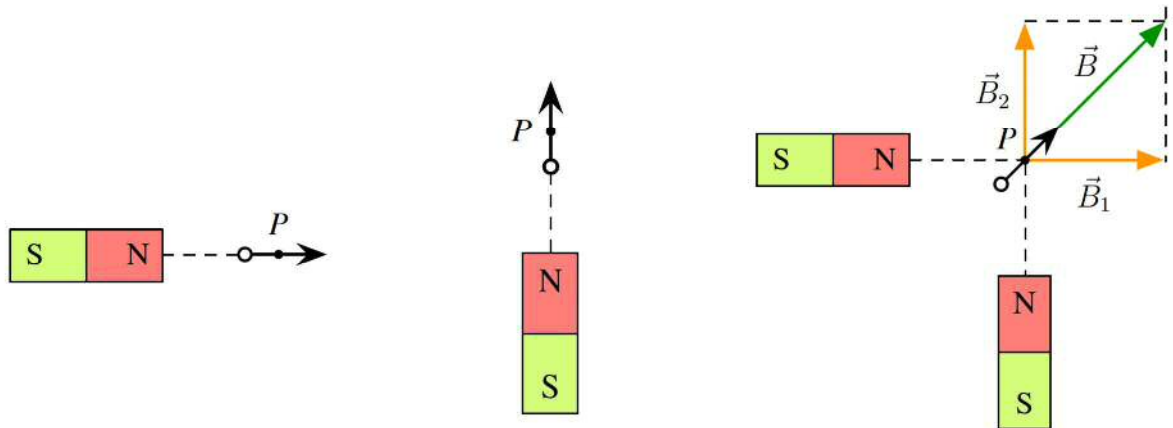
L'unité de la valeur du champ magnétique est le *tesla* (T). La valeur du champ magnétique en un point donné est mesurée à l'aide d'un *teslamètre*.

7.1.3 Superposition de champs magnétiques

Expérience 7.2 Nous disposons de deux aimants droits identiques et d'une petite aiguille aimantée. L'aiguille est placée en un point P d'une feuille de papier. On relève l'orientation de l'aiguille en présence :

- du 1^{er} aimant (figure 7.3a) ;
- du 2^e aimant (figure 7.3b) ;
- des deux aimants (figure 7.3c).

On représente les vecteurs champ de même valeur \vec{B}_1 et \vec{B}_2 qu'on observe au point P en présence respectivement du 1^{er} et du 2^e aimant seul. On construit ensuite le vecteur champ résultant $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$.



(a) en présence du 1^{er} aimant (b) en présence du 2^e aimant (c) en présence des deux aimants

FIGURE 7.3 – Orientation d'une aiguille aimantée

Observation :

En présence des deux aimants, l'aiguille s'oriente dans la direction du vecteur champ résultant.

Principe de superposition *En présence de plusieurs aimants, le vecteur champ résultant en un point est égale à la somme vectorielle des vecteurs champs magnétiques que l'on observerait en présence de chacun des aimants seuls.*

7.1.4 Lignes de champ

Lorsqu'on déplace une aiguille aimantée dans la direction et dans le sens du vecteur champ magnétique \vec{B} , on dessine une courbe orientée appelée *ligne de champ*. Une ligne de champ commence au pôle nord d'un aimant et se termine en son pôle sud.

En un point donné, le vecteur \vec{B} est par conséquent tangent à la ligne de champ passant par ce point et orienté dans le même sens.

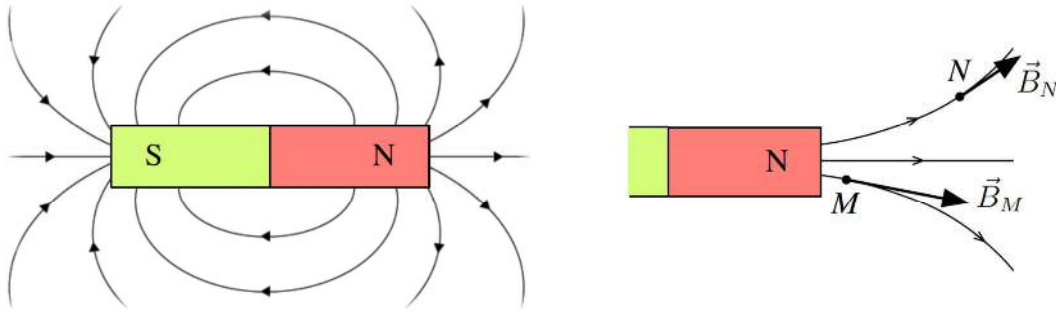


FIGURE 7.4 – Spectre magnétique

Un *spectre* est constitué par un ensemble de lignes de champ (figure 7.4). Plus les lignes de champ sont rapprochées, plus le champ est intense.

Expérience 7.3 Saupoudrons de la limaille de fer sur une plaque de plexiglas disposée au-dessus d'un aimant droit.

Observation :

Les grains de limaille se distribuent suivant les lignes de champ le long desquelles ils s'enchaînent les uns aux autres, visualisant ainsi le spectre magnétique de l'aimant droit (figure 7.5).

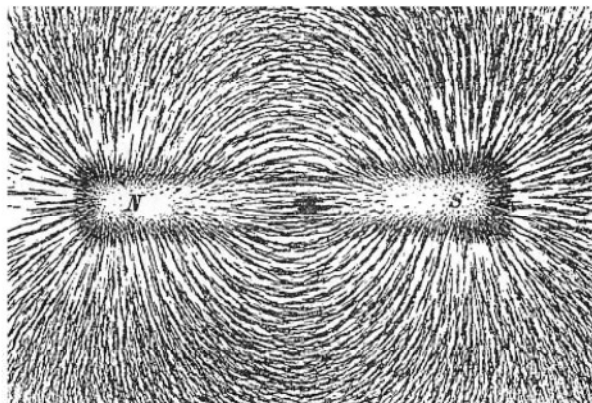


FIGURE 7.5 – Spectre magnétique d'un aimant droit

Interprétation :

Les grains de limaille de fer s'aimantent en présence de l'aimant droit et s'orientent dans le champ magnétique comme des aiguilles aimantées.

7.1.5 Champ magnétique créé par un aimant

Les figures 7.4 et 7.5 montrent le spectre magnétique d'un aimant droit. Considérons le champ magnétique créé par un aimant en U.

Expérience 7.4 Formons le spectre magnétique d'un aimant en U, dans la région de son *entrefer*.

Observation :

Le spectre magnétique fait apparaître des lignes de champ parallèles entre elles et perpendiculaires aux branches de l'aimant (figure 7.6).

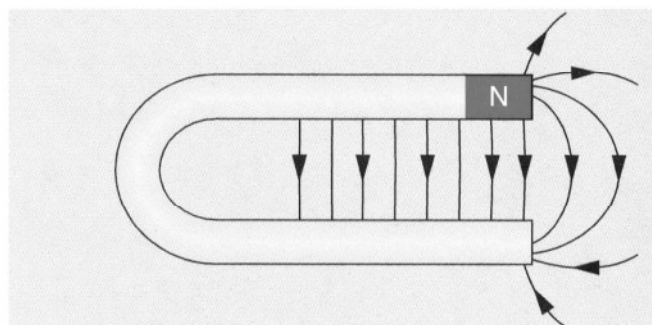


FIGURE 7.6 – Spectre magnétique d'un aimant en U

Des mesures précises montrent que le champ magnétique a la même valeur en tout point de l'entrefer. On dit qu'il y est *uniforme*.

7.1.6 Champ magnétique créé par un courant

L'effet magnétique du courant électrique fut découvert par Christian Ørsted. Une aiguille placée au voisinage immédiat d'un fil conducteur parcouru par un courant électrique subit une déviation.

Un courant électrique crée un champ magnétique. Nous allons étudier les spectres magnétiques d'un fil rectiligne, d'une bobine plate et d'un solénoïde parcourus par un courant électrique.

Fil rectiligne

Expérience 7.5 Formons le spectre magnétique du champ créé par un fil rectiligne vertical parcouru par un courant. Saupoudrons de la limaille de fer dans un plan perpendiculaire au fil. Plaçons également quelques aiguilles aimantées au voisinage du fil.

Observation :

Le spectre magnétique fait apparaître des lignes de champ en forme de cercles centrés sur le fil (figure 7.7a). L'orientation des aiguilles aimantées s'inverse lorsque nous changeons le sens du courant (figure 7.7b).

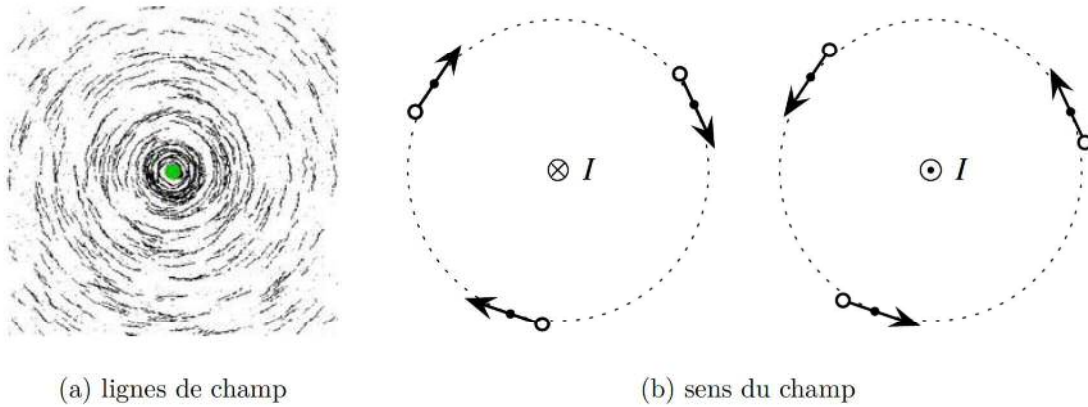


FIGURE 7.7 – Spectre magnétique d'un fil rectiligne

Remarque : un vecteur ou un courant perpendiculaire au plan d'étude sera représenté par :

- ⊙ lorsqu'il est dirigé vers l'avant du plan ;
- ⊗ lorsqu'il est dirigé vers l'arrière du plan.

Propriétés *Les lignes de champ magnétique d'un courant électrique rectiligne sont des cercles ayant pour axe le fil transportant le courant.*

Le sens du champ magnétique peut être déterminé à l'aide de la règle de la main droite :

pouce → *sens du courant*
index → *sens du champ magnétique*

La valeur du vecteur champ est proportionnelle à l'intensité du courant.

Solénoïde

Un solénoïde est constitué d'un fil conducteur enroulé régulièrement en hélice de façon à former une bobine dont la longueur est grande par rapport à son rayon.

Expérience 7.6 Formons le spectre magnétique du champ créé par un solénoïde d'axe horizontal parcouru par un courant électrique. Saupoudrons de la limaille de fer dans un plan horizontal contenant l'axe du solénoïde. Plaçons également quelques aiguilles aimantées à l'intérieur du solénoïde.

Observations :

- Le spectre magnétique à l'extérieur du solénoïde a la même allure que celui d'un aimant droit. À l'intérieur du solénoïde et suffisamment loin des extrémités, les lignes de champ sont parallèles à l'axe du solénoïde (figure 7.8a).
- L'orientation des aiguilles aimantées s'inverse lorsque nous changeons le sens du courant (figure 7.8b).

Une étude quantitative montre que la valeur B du champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde de longueur L comprenant N spires est proportionnelle :

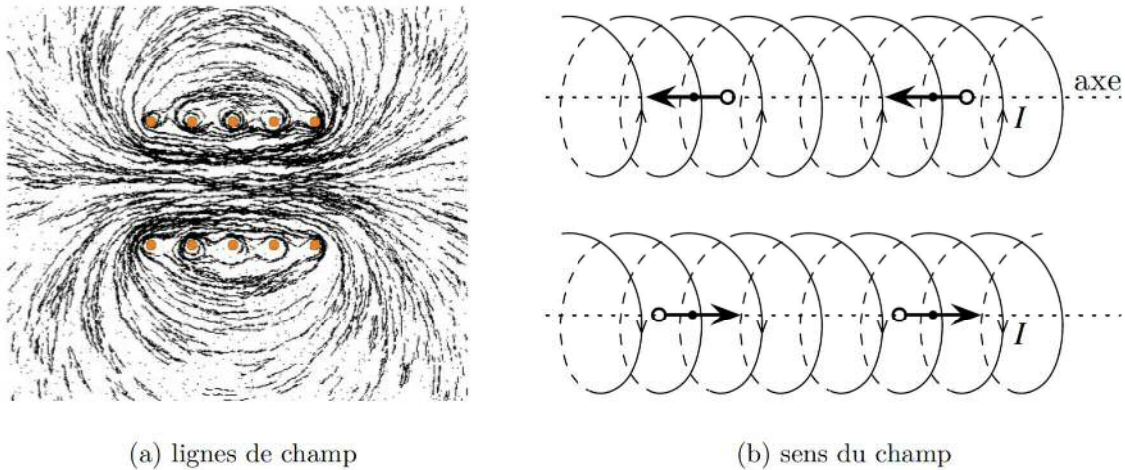


FIGURE 7.8 – Spectre magnétique d'un solénoïde

- à l'intensité I du courant qui le parcourt ;
- au rapport $n = N/L$ indiquant le nombre de spires par unité de longueur.

Les résultats suivants s'appliquent au champ magnétique à l'intérieur du solénoïde, suffisamment loin de ses extrémités.

Propriétés *Un solénoïde parcouru par un courant électrique crée un champ magnétique uniforme et de même direction que l'axe du solénoïde.*

Le sens du champ magnétique peut être déterminé à l'aide de la règle de la main droite :

pouce \rightarrow *sens du champ magnétique*

index \rightarrow *s'appliquant sur les spires indique le sens du courant*

La valeur du vecteur champ est donnée par l'expression :

$$B = \mu_0 n I$$

avec $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T m A}^{-1}$ appelée perméabilité magnétique du vide.

Bobine plate

Une bobine plate est constitué d'un fil conducteur enroulé de façon à former une bobine dont la longueur est petite par rapport à son rayon. La figure 7.9 montre le spectre d'une bobine plate.

Les résultats suivants s'appliquent au champ magnétique créé au centre d'une bobine plate à spires circulaires.

Énoncé *Une bobine plate parcouru par un courant électrique crée un champ magnétique dont la direction est l'axe de la bobine.*

Le sens du champ magnétique peut être déterminé à l'aide de la règle de la main droite :

pouce \rightarrow *sens du champ magnétique*

index \rightarrow *s'appliquant sur les spires indique le sens du courant*

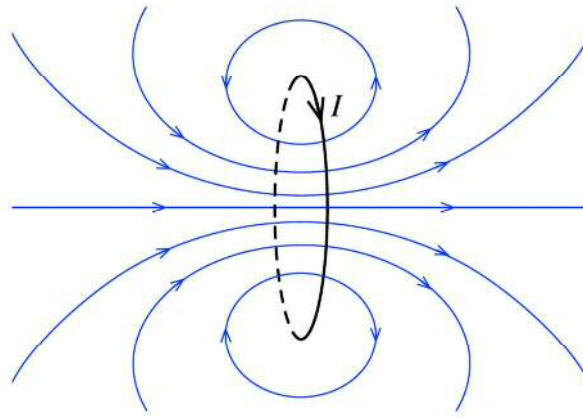


FIGURE 7.9 – Spectre magnétique d'une bobine plate

La valeur du vecteur champ est donnée par l'expression :

$$B = \mu_0 \frac{N}{2R} I$$

ou R est le rayon des spires.

La configuration dite « bobines de Helmholtz » est l'association de deux bobines plates identiques séparées par une distance égale à leur rayon sur leur axe commun (figure 7.10a).

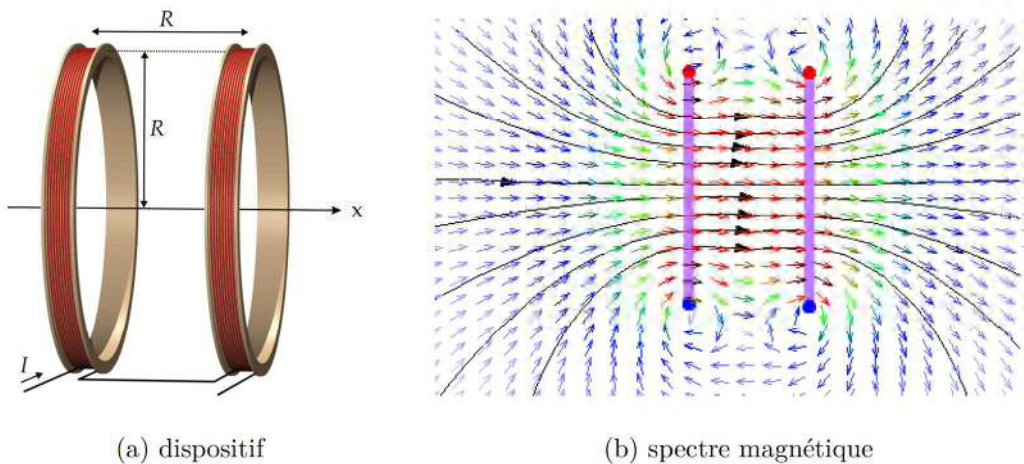


FIGURE 7.10 – Bobines de Helmholtz

En faisant circuler des courants de même intensité et de même sens dans ces bobines, un champ magnétique est créé qui a la particularité d'être relativement uniforme au centre du dispositif (figure 7.10b).

7.1.7 Le champ magnétique terrestre

Le champ magnétique terrestre est produit par le noyau externe de la Terre, une couche liquide constituée en majorité de fer et de nickel. Le noyau étant conducteur, il peut être

parcouru par des courants électriques et donc engendrer un champ magnétique. Ce champ est entretenu par les mouvements de matière dans le noyau.

Le champ magnétique terrestre est approximativement celui d'un aimant droit (figure 7.11). Le pôle nord magnétique de cet aimant terrestre pointe vers le sud géographique.

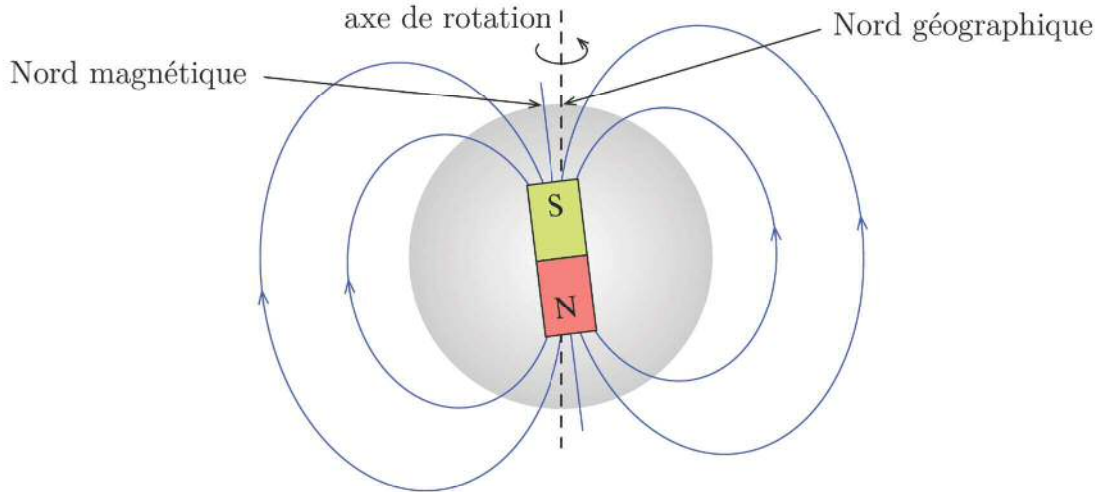


FIGURE 7.11 – Champ magnétique terrestre

En un point donné du champ magnétique terrestre, le vecteur champ terrestre \vec{B} possède une composante verticale \vec{B}_v dirigée vers le centre de la Terre et une composante horizontale \vec{B}_h dirigée approximativement vers le nord géographique.

Dans un plan vertical contenant le vecteur champ \vec{B} , ce dernier fait avec l'horizontale un angle variable avec le lieu, appelé *inclinaison* i (figure 7.12a). Dans nos régions $i \approx 60^\circ$.

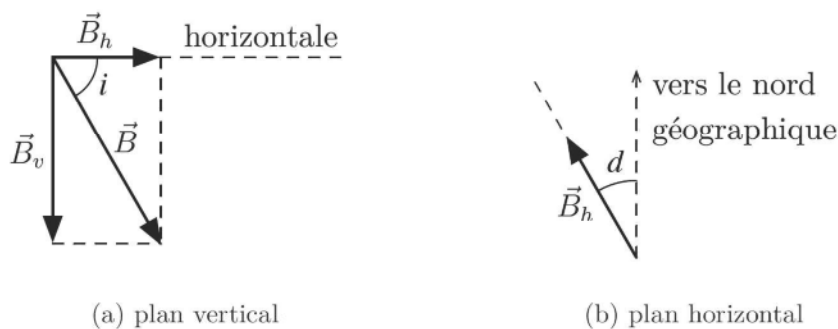


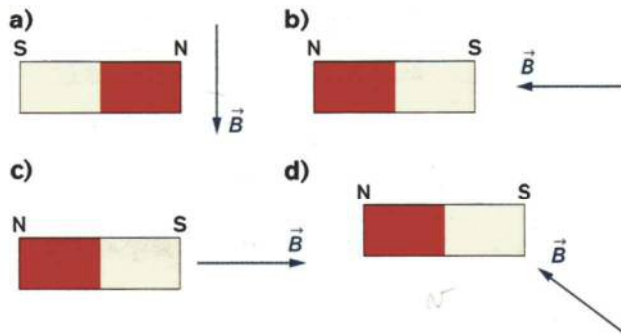
FIGURE 7.12 – Orientation du vecteur champ magnétique terrestre

Dans un plan horizontal, la composante horizontale du vecteur champ fait avec le méridien géographique un angle variable avec le lieu, appelé *déclinaison* d (figure 7.12b). Dans nos régions d est très petit.

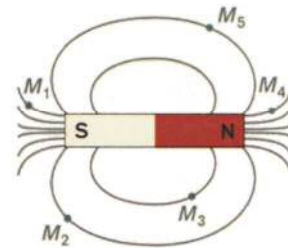
Dans nos régions, la valeur du vecteur champ est approximativement $B \approx 4 \cdot 10^{-5}$ T. Les valeurs des composantes du vecteur champ sont respectivement $B_h = B \cos i \approx 2 \cdot 10^{-5}$ T et $B_v = B \sin i \approx 3,5 \cdot 10^{-5}$ T.

7.1.8 Exercices

Exercice 7.1 Vrai ou faux ? Rectifier si nécessaire.



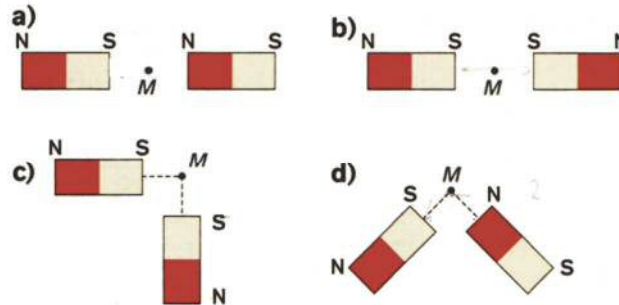
Exercice 7.1



Exercice 7.2

Exercice 7.2 À partir du spectre magnétique représenté, tracer le vecteur champ magnétique aux différents points.

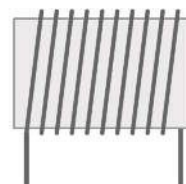
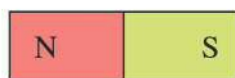
Exercice 7.3 On dispose de deux barreaux aimantés identiques. La valeur du champ magnétique au point M dû à chaque aimant est $B = 20 \text{ mT}$. Représenter le vecteur champ magnétique au point M toujours situé à la même distance d de chacun des aimants. Calculer la valeur de \vec{B} en M .



Exercice 7.3

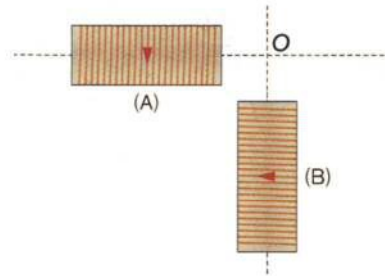
Exercice 7.4 On veut obtenir au centre d'un solénoïde de longueur $l = 50 \text{ cm}$, un champ magnétique d'intensité 2 mT , l'intensité du courant étant de 1 A . Déterminer le nombre de spires nécessaires.

Exercice 7.5 Un aimant droit disposé selon l'axe d'un solénoïde s'orienté selon le schéma ci-dessous.



1. Quelle est la face nord du solénoïde ?
2. Quel est le sens du courant qui circule dans le solénoïde ?
3. Représenter le champ magnétique \vec{B}_0 au milieu du solénoïde et dessiner quelques lignes de champ.

Exercice 7.6 Deux solénoïdes identiques sont disposés comme l'indique la figure. Leurs axes sont perpendiculaires et se coupent en O .



1. Les sens de courant dans chaque solénoïde sont représentés sur le schéma. Préciser le sens des vecteurs champ magnétique \vec{B}_1 créé par (A) et \vec{B}_2 créé par (B) au point O .
2. Quelle sera la direction et le sens de l'aiguille aimantée si en O les valeurs des champs sont $B_1 = B_2 = 2,3 \text{ mT}$?
3. Représenter chaque vecteur à la même échelle. Calculer la valeur de $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$.
4. Que devient l'orientation de l'aiguille aimantée si on change le sens du courant dans le solénoïde (A) ?
5. Les sens des courants sont de nouveau ceux de la première question mais on double l'intensité du courant qui traverse (A). Représenter à nouveau \vec{B}_1 et \vec{B}_2 . Calculer la nouvelle valeur de \vec{B} ainsi que la nouvelle orientation de l'aiguille aimantée.

7.2 Forces magnétiques

Comme les charges en mouvement qui constituent un courant électrique créent un champ magnétique, on peut s'interroger sur l'action d'un champ magnétique sur une charge électrique.

7.2.1 Force de Lorentz

Expérience 7.7 Un faisceau d'électrons entre à la vitesse \vec{v}_0 dans le champ uniforme \vec{B} créé par des bobines de Helmholtz.

Observations :

- $\vec{B} = 0$ ou $\vec{B} \parallel \vec{v}_0$: le faisceau n'est pas dévié, le mouvement d'un électron est rectiligne et uniforme (figure 7.13).

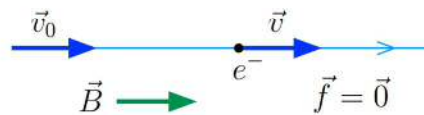


FIGURE 7.13 – Le faisceau d'électrons n'est pas dévié

- $\vec{B} \neq 0$ et $\vec{B} \perp \vec{v}_0$: la trajectoire du faisceau est un cercle de rayon r , le mouvement d'un électron est circulaire et uniforme (figure 7.14).

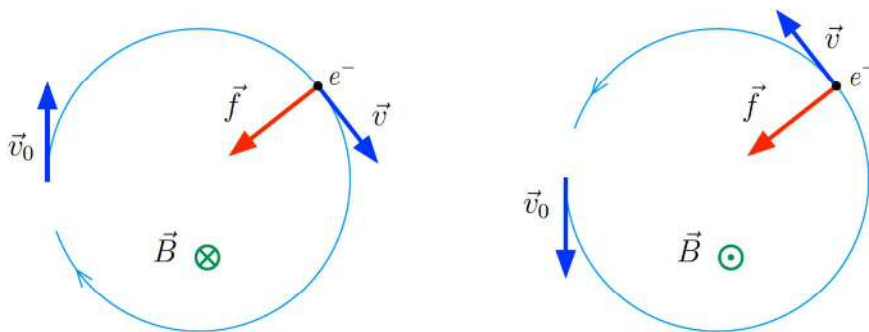


FIGURE 7.14 – La trajectoire du faisceau est un cercle

En faisant varier la valeur B du champ magnétique et la vitesse v_0 des électrons on constate que :

- r diminue si B augmente ;
- r augmente si v_0 augmente.

Le sens du mouvement change lorsqu'on inverse le sens du champ magnétique.

Conclusions :

Une force magnétique \vec{f} , appelée *force de Lorentz*, agit sur les électrons en mouvement. Les propriétés suivantes peuvent être déduites des observations de l'expérience :

- la force est perpendiculaire aux vecteurs champ et vitesse ;
- son intensité dépend des valeurs de la vitesse et du champ ;
- elle est nulle si les vecteurs vitesse et champ sont parallèles ou si au moins un des deux vecteurs est nul.

Loi de Lorentz La force magnétique \vec{f} subie par une particule de charge q se déplaçant avec la vitesse \vec{v} dans un champ magnétique \vec{B} s'écrit :

$$\vec{f} = q \vec{v} \times \vec{B}$$

Les caractéristiques de la force de Lorentz sont :

direction \vec{f} est perpendiculaire à \vec{v} et à \vec{B} ;

sens déterminé à l'aide de la règle de la main droite :

pouce \rightarrow sens de $q\vec{v}$

index \rightarrow sens du champ magnétique \vec{B}

majeur \rightarrow sens de la force de Lorentz \vec{f}

intensité $f = |q \sin \alpha| v B$, où α est l'angle formé par \vec{v} et \vec{B} .

Remarque : l'expression $\vec{v} \times \vec{B}$ est le *produit vectoriel* des deux vecteurs.

La force de Lorentz est à tout instant perpendiculaire à la trajectoire de la particule chargée. Son travail est nul et, d'après le théorème de l'énergie cinétique, elle ne contribue pas à la variation de l'énergie cinétique de la particule chargée. Il n'y a pas d'énergie potentielle associée à cette force.

En pratique, on utilise un champ magnétique pour dévier une particule chargée sans changer la valeur de sa vitesse. Le *spectrographe de masse* et le *cyclotron* sont des applications de la force de Lorentz.

7.2.2 Force de Laplace

Lorsqu'un conducteur électrique est parcouru par un courant, un grand nombre d'électrons (de l'ordre du nombre d'Avogadro) est en mouvement. La résultante des forces sur les électrons est mise en évidence dans l'expérience suivante.

Mise en évidence expérimentale

Expérience 7.8 Une tige de cuivre est mobile autour d'un point O . Une partie de la tige se trouve entre les branches d'un aimant en U. Les extrémités de la tige sont reliées à un générateur qui permet de faire passer un courant électrique I à travers la tige (figure 7.15).

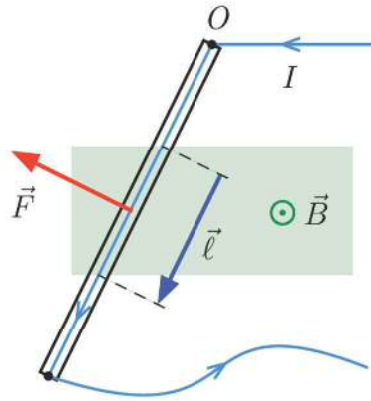


FIGURE 7.15 – Courant électrique dans un champ magnétique

Observations :

- En absence d'un courant électrique la tige reste immobile.
- La tige s'écarte de sa position d'équilibre lorsqu'elle est parcourue par un courant électrique.
- La direction du déplacement est parallèle aux branches de l'aimant.
- Le sens du déplacement change si :
 - le sens du courant électrique est inversé ;
 - les pôles de l'aimant sont permutés.

Conclusion :

Une force s'exerce sur un conducteur parcouru par un courant électrique et placé dans un champ magnétique. Cette force électromagnétique est appelée *force de Laplace*.

Loi de Laplace La force électromagnétique \vec{F} exercée par un champ magnétique uniforme \vec{B} sur une portion de conducteur rectiligne de longueur ℓ , parcourue par un courant électrique d'intensité I s'écrit :

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

où $\vec{\ell}$ est un vecteur de longueur ℓ , parallèle au conducteur et orienté dans le sens du courant. Les caractéristiques de la force de Laplace sont :

direction \vec{F} est perpendiculaire à $\vec{\ell}$ et à \vec{B} ;

sens déterminé à l'aide de la règle de la main droite :

pouce \rightarrow sens de I

index \rightarrow sens du champ magnétique \vec{B}

majeur \rightarrow sens de la force de Laplace \vec{F}

intensité $F = |I \sin \alpha| \ell B$, où α est l'angle formé par $\vec{\ell}$ et \vec{B} .

Origine

1^{er} cas : le conducteur est au repos.

En absence d'un courant électrique, le mouvement des électrons est désordonné et la résultante des forces magnétiques sur ces électrons est nulle. Lorsqu'on établit un courant, le déplacement des électrons est parallèle au conducteur et dans le sens contraire du courant (figure 7.16).

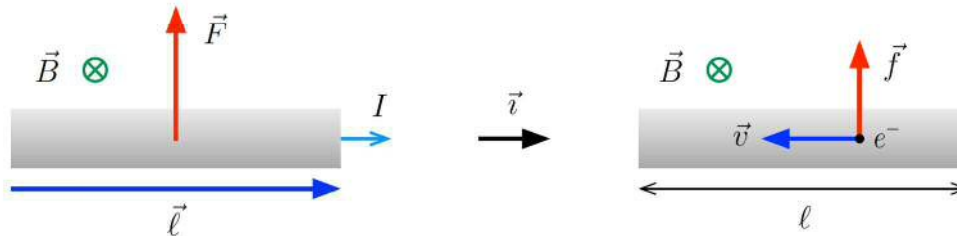


FIGURE 7.16 – Conducteur au repos dans un champ magnétique

La force de Laplace est la résultante des forces magnétiques exercées sur les électrons en mouvement dans portion de longueur ℓ du conducteur qui se trouve dans le champ magnétique :

$$\vec{F} = \sum q \vec{v} \times \vec{B} = -(\sum e) \vec{v} \times \vec{B}.$$

Le vecteur vitesse d'un électron s'écrit $\vec{v} = -v \vec{i}$, où \vec{i} est le vecteur unitaire parallèle au conducteur et orienté dans le sens du courant. Il vient :

$$\vec{F} = (\sum e) v \vec{i} \times \vec{B}.$$

La somme s'étend sur tous les électrons en mouvement dans la portion du conducteur. Cette charge Q va traverser la section délimitant le conducteur en un temps t :

$$\sum e = Q = I t$$

où t est le temps que met un électron pour traverser le conducteur :

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

L'expression de la force résultante devient :

$$\vec{F} = Q v \vec{i} \times \vec{B} = I t v \vec{i} \times \vec{B} = I \ell \vec{i} \times \vec{B}.$$

En remarquant que $\vec{\ell} = \ell \vec{i}$, on retrouve l'expression de la force de Laplace :

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

Cette force exercée sur les électrons est transmise au conducteur.

2^e cas : le conducteur est en mouvement.

Lorsque le conducteur est parcouru par un courant continu, il existe également une force électrique qui s'exerce sur l'électron (figure 7.17). La résultante des forces magnétique et électrique sur chaque électron est perpendiculaire au conducteur et contribue à la force de Laplace.

Le champ électrique qui apparaît dans le conducteur est nécessaire pour maintenir le courant. Lorsque le déplacement est dans le sens de la force de Laplace, le champ électrique et le courant ont le même sens. En changeant le sens du déplacement, le sens du champ électrique s'inverse.

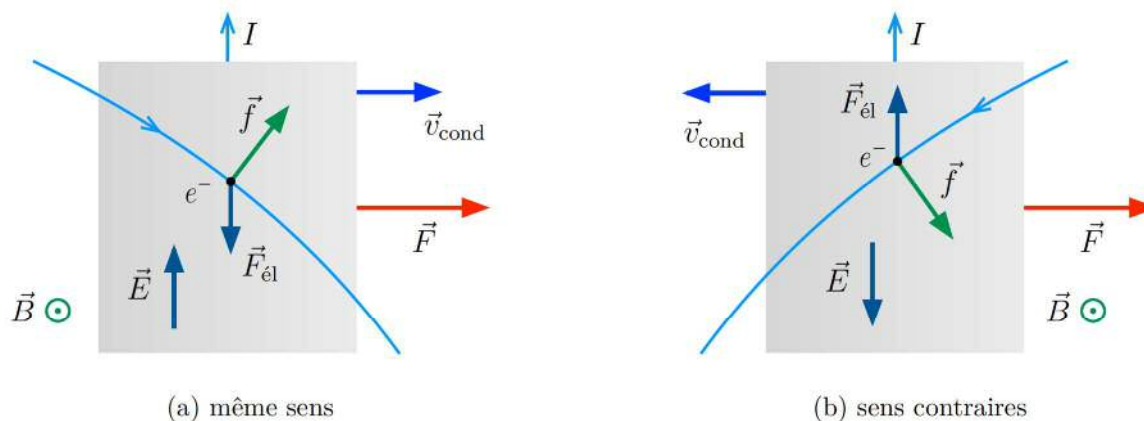


FIGURE 7.17 – Déplacement d'un conducteur dans un champ magnétique

Applications

Une des applications les plus importantes est le *moteur électrique*. Le dispositif de l'expérience suivante est un moteur rudimentaire, appelé les rails de Laplace.

Expérience 7.9 Une tige en cuivre peut se déplacer en roulant sur des rails conducteurs (figure 7.18). Les rails sont disposés entre les branches d'un aimant en U et reliés à un générateur de courant.

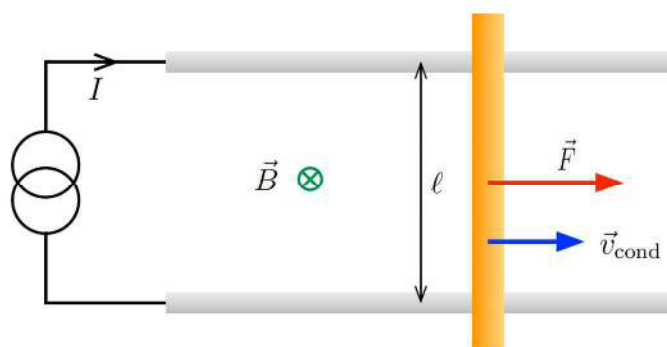


FIGURE 7.18 – Les rails de Laplace

Observations :

- Lorsqu'on établit un courant électrique dans le circuit, la tige se met en mouvement.
- Le direction du déplacement est parallèle au rails.
- Le sens du déplacement change si :
 - le sens du courant électrique est inversé ;
 - les pôles de l'aimant sont permutés.

Conclusion :

La force de Laplace effectue un travail moteur pour mettre en mouvement la tige. Sa puissance est :

$$P(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{v}_{\text{cond}} = F v_{\text{cond}}.$$

Une partie de l'énergie électrique fournie par le générateur est convertie en énergie mécanique. C'est le principe des moteurs à courant continu.

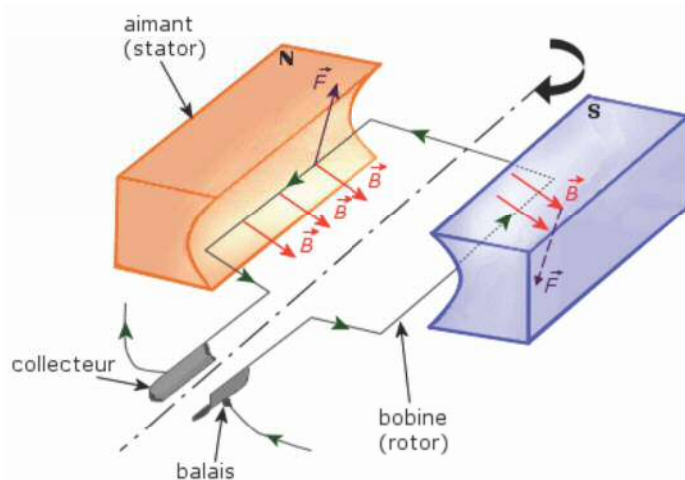


FIGURE 7.19 – Schéma d'un moteur électrique

La plupart des moteurs électriques produisent un mouvement de rotation autour d'un axe fixe. Un moteur à courant continu est constitué de deux pièces principales (figure 7.19) :

- le *stator*, un aimant fixe dont le rôle est de créer un champ magnétique ;
- le *rotor*, association de spires conductrices mobile autour d'un axe.

Les forces de Laplace exercées sur les portions de conducteur parallèles à l'axe tendent à faire tourner la spire dans le même sens autour de l'axe (figure 7.20a).

Après un demi-tour, le sens du courant doit être inversé pour que le sens de rotation soit inchangé. C'est le rôle du *collecteur* (figure 7.20b), association de deux demi-cylindres métalliques, séparés par un isolant, auxquels la spire est reliée. Les deux balais, le plus souvent en graphite, assurent la liaison avec le générateur.

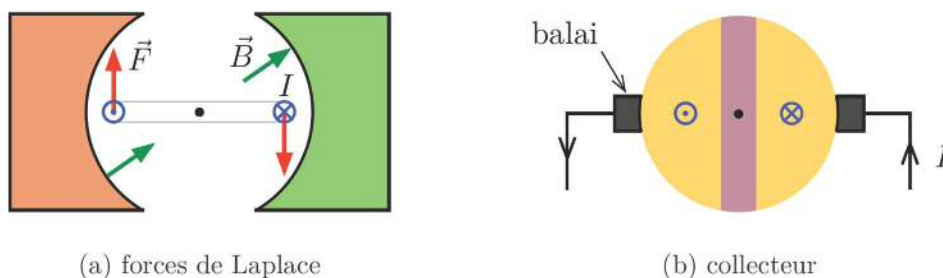


FIGURE 7.20 – Principe de fonctionnement d'un moteur électrique

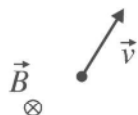
L'applet « moteur électrique¹ » présente une simulation d'un moteur électrique constitué d'une spire tournant dans le champ d'un aimant en U.

¹http://www.walter-fendt.de/ph14f/electricmotor_f.htm

7.2.3 Exercices

Exercice 7.7 Déterminer dans les cas suivants la direction, le sens et l'intensité de la force de Lorentz si $v = 2 \cdot 10^4$ m/s, $B = 0,1$ T et $|q| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C :

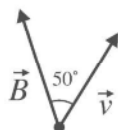
a) $q < 0$



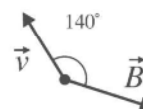
b) $q > 0$



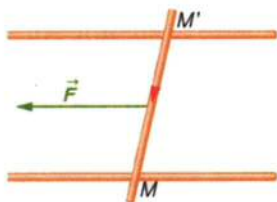
c) $q > 0$



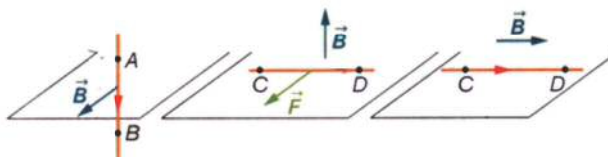
d) $q < 0$



Exercice 7.8 La direction du champ magnétique uniforme \vec{B} est verticale, préciser, en le justifiant, quel est son sens.



Exercice 7.8

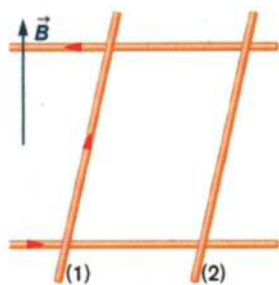


Exercice 7.9

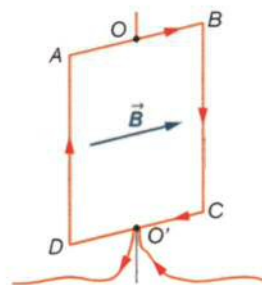
Exercice 7.9 En appliquant dans chaque cas la loi de Laplace, trouver les caractéristiques manquantes.

Exercice 7.10 Sous l'effet de la force de Laplace, la tige se déplace de (1) en (2).

1. Représenter la force de Laplace.
2. Exprimer le travail de la force de Laplace au cours du déplacement.



Exercice 7.10



Exercice 7.11

Exercice 7.11 On donne : $AB = BC = CD = DA = 10 \text{ cm}$; $I = 5,0 \text{ A}$; $B = 450 \text{ mT}$.

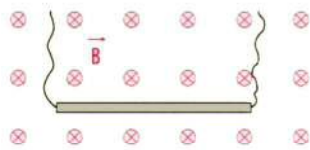
1. Donner les caractéristiques des forces qui s'appliquent sur les tiges AB , BC , CD et DA . Les représenter.
2. Le cadre se met-il en mouvement sous l'action de ces forces? Si oui, préciser son mouvement.

Exercice 7.12 Une tige conductrice de longueur $\ell = 10 \text{ cm}$, parcourue par un courant d'intensité $I = 3 \text{ A}$, fait un angle de 65° avec la direction d'un champ magnétique uniforme de valeur $B = 150 \text{ mT}$. Calculer la valeur de la force de Laplace qui s'applique sur la tige.

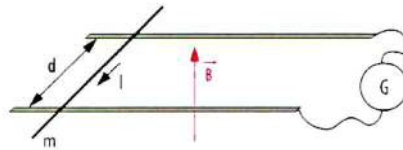
Exercice 7.13 Calculer la puissance développée par la force de Laplace qui déplace une tige de 7 cm , parcourue par un courant d'intensité $I = 5 \text{ A}$, dans un champ magnétique perpendiculaire à la tige de valeur $B = 220 \text{ mT}$, d'une distance de 10 cm en $1,2 \text{ s}$.

Exercice 7.14 Un conducteur est suspendu à l'aide de deux fils souples dans un champ magnétique. Un courant d'intensité I est établi dans le conducteur pour que la tension dans les fils soit nulle.

1. Déterminer le sens du courant. Exprimer l'intensité I en fonction de la masse volumique ρ du conducteur, de sa section S , de l'intensité de la pesanteur g et de la valeur B du champ magnétique.
2. Calculer I pour un conducteur en aluminium de section 100 mm^2 dans un champ magnétique de 200 mT .



Exercice 7.14



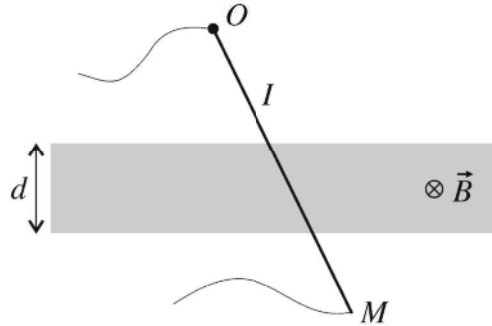
Exercice 7.15

Exercice 7.15 Un conducteur de masse m glisse sans frottement sur deux rails horizontaux écartés d'une distance d et placés dans un champ magnétique uniforme. Un courant d'intensité I circule dans le conducteur et dans les rails.

Déterminer le sens et la valeur de la vitesse du conducteur en fonction du temps s'il est au repos à l'instant $t = 0$.

Exercice 7.16 Un fil en cuivre de longueur $l = 50 \text{ cm}$ est traversé par un courant d'intensité $I = 10 \text{ A}$. Il se trouve dans un plan horizontal et est perpendiculaire à la direction sud-nord magnétique. L'inclinaison du champ magnétique terrestre est $i = 60^\circ$. Déterminer la direction et l'intensité de la force de Laplace.

Exercice 7.17 Un conducteur en cuivre de masse $m = 100$ g, de longueur $OM = 25$ cm, mobile autour de O , est placé entre les pôles d'un aimant en U. Il est parcouru par un courant électrique d'intensité $I = 2$ A. La valeur du champ magnétique uniforme qui s'étend sur $d = 4$ cm est $B = 0,8$ T.



1. Représenter sur une figure les forces qui agissent sur le conducteur.
2. Déterminer le sens du courant électrique.
3. Calculer, à l'équilibre, l'angle θ entre le conducteur et la verticale.

7.3 Induction électromagnétique

Un courant électrique produit un champ magnétique. Le processus inverse est-il également possible ? Joseph Henry (en 1830) et Michael Faraday (en 1831) réalisèrent indépendamment des expériences qui montrèrent qu'il est possible de produire des effets électriques à partir de champs magnétiques. Ce phénomène, appelé *induction électromagnétique*, fut une des majeures découvertes en vue de la production de l'électricité utilisée dans la vie de tous les jours.

7.3.1 Mise en évidence expérimentale

Quelques expériences simples permettent de mettre en évidence les caractéristiques essentielles de l'induction électromagnétique.

Expérience 7.10 Une bobine reliée à un ampèremètre et un aimant droit sont en mouvement relatif (figure 7.21).

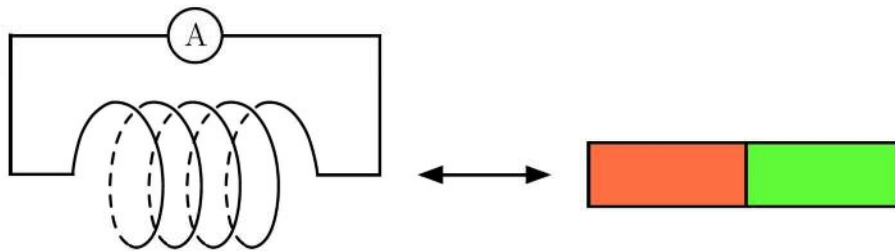


FIGURE 7.21 – Mouvement relatif d'une bobine et d'un aimant

Observations :

- Lorsque la bobine et l'aimant sont en mouvement relatif, un courant électrique d'intensité I circule dans la bobine.

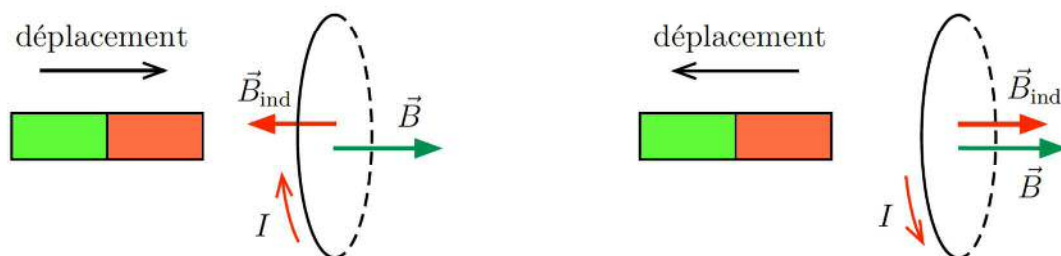


FIGURE 7.22 – Sens du courant électrique dans la bobine

- Le sens du courant électrique dans la bobine change si :
 - le sens du déplacement est inversé (figure 7.22) ;
 - les pôles de l'aimant sont permutés.
- L'intensité I du courant dépend de la vitesse relative de la bobine et de l'aimant.

Interprétation :

La variation du champ magnétique au niveau de la bobine crée un *courant induit* dans la bobine. Ce phénomène est l'induction électromagnétique.

Le courant induit crée un champ magnétique induit \vec{B}_{ind} qui se superpose au champ créé par l'aimant.

Expérience 7.11 Considérons deux bobines immobiles disposées en vis-à-vis (figure 7.23). La bobine à droite, appelée *bobine primaire* ou *inducteur*, est reliée à une pile et à un interrupteur. La bobine à gauche, appelée *bobine secondaire* ou *induit*, est reliée à un ampèremètre.

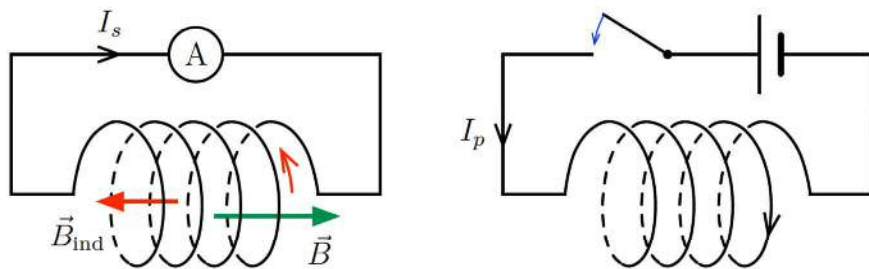


FIGURE 7.23 – Une bobine inducteur et une bobine induit

Observations :

- À la fermeture de l'interrupteur, un bref courant induit I_s apparaît dans la bobine secondaire.
- Tant que le courant I_p reste constant, il ne se passe rien.
- Si on ouvre l'interrupteur, l'ampèremètre détecte un bref courant induit dans le sens opposé.

Interprétation :

Le courant I_p crée un champ magnétique \vec{B} au niveau de la bobine secondaire. La variation de ce champ magnétique lors de la fermeture et puis lors de l'ouverture de l'interrupteur crée un courant induit dans la bobine secondaire.

Expérience 7.12 Une boucle circulaire de fil conducteur flexible est placée dans un champ magnétique uniforme de sorte que son plan soit perpendiculaire au vecteur champ (figure 7.24). On déforme la boucle en tirant subitement sur deux points diamétralement opposés.

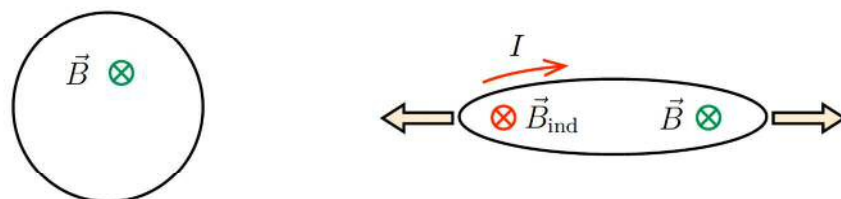


FIGURE 7.24 – Déformation d'une boucle de fil conducteur flexible

Observation : lors de la déformation, un courant induit apparaît dans le fil conducteur.

Interprétation :

Le champ magnétique au niveau de la boucle est constant. La variation de l'aire de la surface délimitée par la boucle crée un courant induit.

Expérience 7.13 Une boucle circulaire de fil conducteur est placée dans un champ magnétique uniforme de sorte que son plan soit perpendiculaire au vecteur champ (figure 7.25). On fait tourner le plan de la boucle par rapport à la direction du champ.

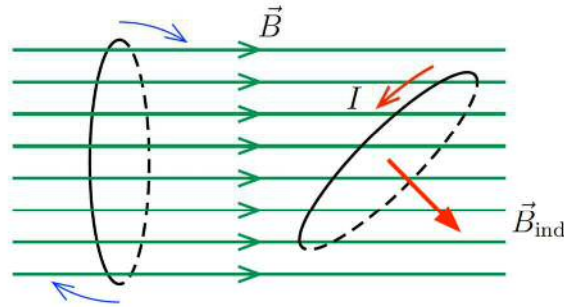


FIGURE 7.25 – Rotation d'une boucle de fil conducteur

Observation : lors de la rotation, un courant induit apparaît dans le fil conducteur.

Interprétation :

Le champ magnétique et l'aire de la boucle sont constants. La variation de l'orientation de la boucle par rapport à la direction du champ crée un courant induit.

7.3.2 Flux magnétique

Soit une boucle de fil conducteur placée dans un champ magnétique. Un courant induit apparaît dans cette boucle si au moins une des grandeurs suivantes varie :

- le champ magnétique au niveau de la boucle ;
- l'aire de la surface délimitée par la boucle ;
- l'orientation du plan de la boucle par rapport à la direction du champ.

Pour pouvoir expliquer ces résultats et formuler les lois de l'induction électromagnétique, nous allons définir une grandeur qui fait intervenir ces trois grandeurs.

Définition *Le flux magnétique Φ à travers une surface plane \vec{S} , plongée dans un champ magnétique \vec{B} , uniforme sur toute la surface, est défini par le produit scalaire :*

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B S \cos\theta$$

où θ est l'angle formé par \vec{B} et \vec{S} .

L'unité de flux magnétique est le *weber* (Wb) : $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T m}^2$.

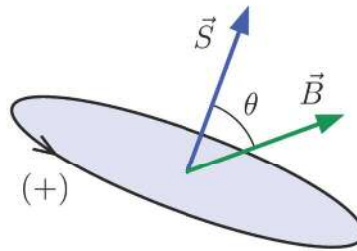


FIGURE 7.26 – Flux magnétique à travers une surface plane

Remarques :

- Le vecteur \vec{S} qu'on associe à la surface est perpendiculaire au plan de la surface, de valeur égale à l'aire de la surface et avec un sens déterminé par la règle de la main droite (figure 7.26) :

pouce \rightarrow sens du vecteur \vec{S}
 index \rightarrow s'appliquant sur le contour dans le sens positif.

- Le flux magnétique est proportionnel au nombre de lignes de champ traversant la surface.
- Pour calculer le flux magnétique à travers une bobine de N spires, on multiplie par N le flux traversant une seule spire.

7.3.3 Lois de l'induction électromagnétique

Avec l'introduction du flux magnétique, le phénomène de l'induction électromagnétique peut être caractérisé par l'énoncé suivant.

Énoncé *Un courant induit apparaît dans une boucle de fil conducteur placée dans un champ magnétique si le flux magnétique à travers cette boucle varie.*

Considérons à nouveau l'expérience 7.10. Le physicien russe Heinrich Friedrich Lenz remarqua que le champ magnétique induit \vec{B}_{ind} , créé par le courant induit, s'oppose à la variation du flux magnétique Φ du champ \vec{B} à travers la boucle :

- si Φ augmente, \vec{B}_{ind} et \vec{B} ont des sens contraires ;
- si Φ diminue, \vec{B}_{ind} et \vec{B} ont le même sens.

Lenz examina d'autres cas et arriva à la même conclusion. James Clerk Maxwell donna un énoncé plus général de la loi de Lenz.

Loi de Lenz *Le sens du courant induit est tel que le flux magnétique qu'il crée s'oppose à la variation de flux magnétique qui le produit.*

Remarque : la loi de Lenz est une conséquence de la conservation de l'énergie.

L'existence d'un courant induit est due à la force électromagnétique $\vec{F}_{\text{ém}}$ qui effectue un travail sur une charge q en mouvement. Le travail de cette force par unité de charge sur un tour complet d'une boucle de fil conducteur est appelé *force électromotrice* (f.é.m.), notée e . On peut donc écrire :

$$W_{\text{boucle}}(\vec{F}_{\text{ém}}) = q e$$

avec :

$$\vec{F}_{\text{ém}} = q \vec{E} + q \vec{v} \times \vec{B}.$$

Michael Faraday découvrit la relation entre la f.é.m. et la variation du flux magnétique.

Loi de Faraday La force électromagnétique e induite dans une boucle de fil conducteur traversée par le flux magnétique Φ est donnée par :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Remarques :

- Si la boucle est remplacée par une bobine de N spires, la f.é.m. induite est :

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

où Φ est le flux magnétique à travers une spire.

- Le sens du déplacement pour le calcul du travail de la force électromagnétique doit être le sens positif choisi pour la boucle.
- Dans un fil conducteur parfait, le travail de la force électromagnétique est nul.
- Sur une portion immobile de la boucle, le travail de la force électromagnétique se réduit au travail du champ électrique.

7.3.4 Applications

Alternateur

Un *alternateur* est une machine rotative qui convertit l'énergie mécanique fournie au rotor en énergie électrique. Plus de 95% de l'énergie électrique est produite par des alternateurs.

Expérience 7.14 Un aimant entraîné par un moteur à vitesse réglable tourne devant une bobine reliée à une lampe. Pour visualiser la tension aux bornes de la bobine on y branche un oscilloscope en parallèle (figure 7.27).

Observations :

- Il apparaît une tension aux bornes de la bobine. On constate que cette tension varie de façon sinusoïdale en fonction du temps. C'est une tension *alternative*.

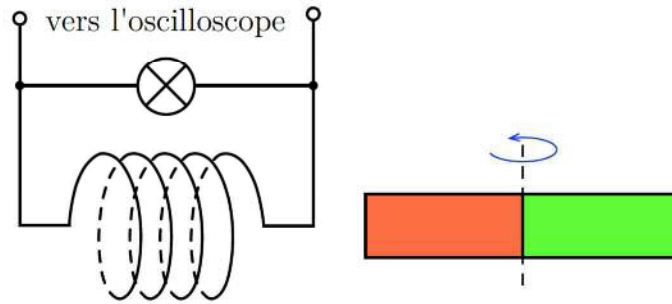


FIGURE 7.27 – Principe de fonctionnement d'un alternateur

- Lorsqu'on augmente la vitesse de rotation de l'aimant, la fréquence de variation de la tension augmente aussi de même que sa valeur maximale.

Interprétation :

Le flux à travers la bobine varie lorsque l'aimant tourne. Cette variation crée un courant induit dans le circuit et une tension aux bornes de la bobine. Plus la rapidité de la variation du flux est grande, plus la f.é.m. est importante.

Transformateur

Un transformateur est constitué de deux bobines enroulées sur un même cadre en fer (figure 7.28).

La bobine primaire de N_1 spires est reliée à un générateur qui tension alternative U_1 . Un récepteur est branché à la bobine secondaire de N_2 spires.

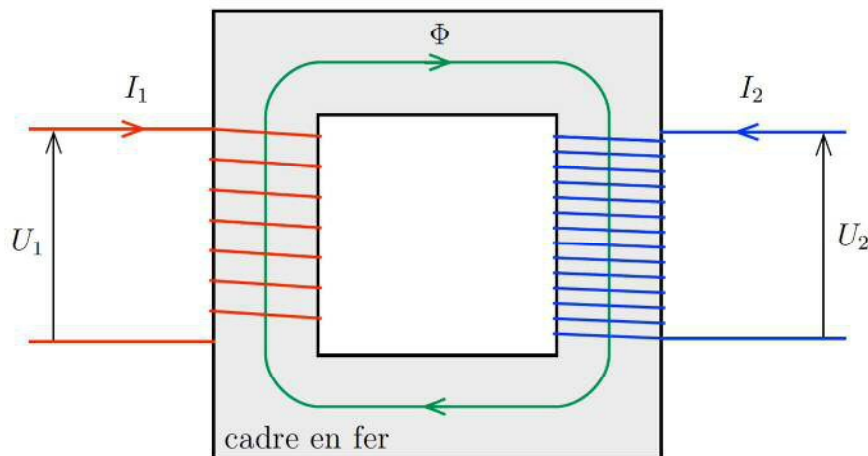


FIGURE 7.28 – Schéma d'un transformateur idéal

Le rôle du cadre est de canaliser les lignes de champ magnétique et de créer un circuit magnétique dans lequel le flux magnétique Φ est le même à travers toute section du cadre.

Le flux variable créé à travers la bobine primaire est transmis à travers la bobine secondaire. La variation du flux crée un courant induit dans la bobine secondaire et une tension U_2 à ses bornes.

Lorsqu'on néglige les fuites de flux magnétique et les pertes par effet Joule dans les bobines, la rapport des tensions vérifie la relation :

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}.$$

Selon le rapport du nombre de spires, un transformateur permet d'élever ou d'abaisser une tension alternative.

En négligeant les pertes et les fuites, la puissance électrique est transmise intégralement. Soient respectivement I_1 et I_2 les intensités des courants dans les circuits primaire et secondaire. L'égalité des puissance permet d'écrire :

$$P_{\text{el}2} = P_{\text{el}1} \implies U_2 I_2 = U_1 I_1$$

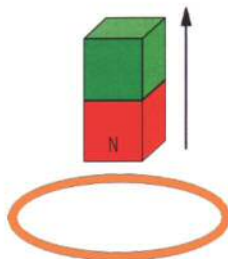
d'où le rapport des intensités :

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}.$$

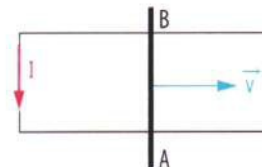
Le rapport des intensités est l'inverse du rapport des tensions.

7.3.5 Exercices

Exercice 7.18 On éloigne le pôle nord d'un aimant d'un anneau métallique. Quel est le sens du courant induit dans l'anneau ?



Exercice 7.18



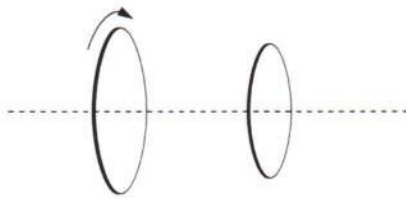
Exercice 7.19

Exercice 7.19 En déplaçant le fil mobile AB vers la droite, il apparaît un courant induit dans le sens représenté. Quel est le sens du champ magnétique dans lequel se trouve le circuit ?

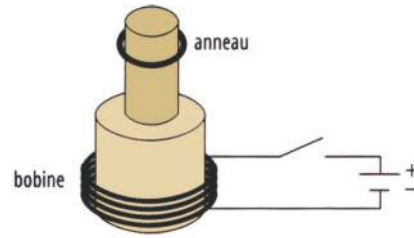
Exercice 7.20 Deux boucles conductrices sont placées sur le même axe. On établit soudainement dans la grande boucle un courant I circulant dans le sens des aiguilles d'une montre.

- Quel est le sens du courant induit dans la petite boucle ?
- Une force est-elle exercée sur la petite boucle ; si oui, dans quel sens ?

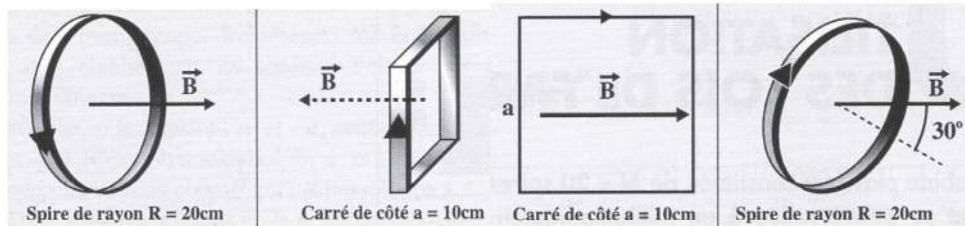
Exercice 7.21 Lorsque l'interrupteur est fermé dans le circuit du dessin, un courant est établi dans la bobine et l'anneau métallique est projeté en l'air. Expliquer ce phénomène.



Exercice 7.20



Exercice 7.21



Exercice 7.22

Exercice 7.22 Calculer le flux dans chacun des cas représentés sur les figures. On supposera le champ \vec{B} uniforme et de valeur égale à 10 mT.

Exercice 7.23 Existe-t-il un courant induit dans les circuits représentés sur la figure ? Si oui, donner son sens.

Exercice 7.24 On considère les deux circuits où les bobines sont placées en vis-à-vis.

1. Que se passe-t-il quand on pousse le bouton poussoir ? Expliquer.
2. S'il y a un courant électrique, donner son sens.

Exercice 7.25 Le flux à travers une spire évolue au cours du temps.

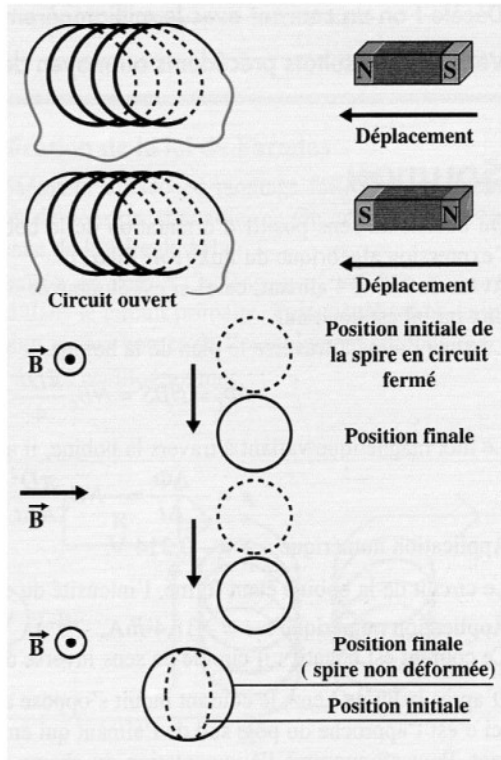
1. Expliquer quel phénomène se produit dans la spire.
2. Représenter l'évolution temporelle de la f.é.m. induite dans la spire.

Exercice 7.26 Une bobine, constituée de 100 spires carrées de 30 cm de côté, est placée dans le champ uniforme \vec{B} d'un électroaimant, comme l'indique la figure. La résistance totale du circuit est 1 k Ω .

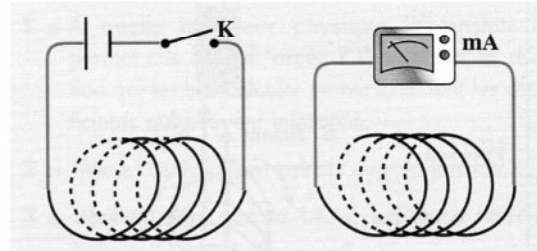
1. Pour $B = 0,1$ T, calculer le flux Φ à travers la bobine.
2. Calculer la f.é.m. induite dans la bobine. Représenter l'évolution temporelle de l'intensité du courant induit dans la bobine et indiquer son sens sur un schéma.

Exercice 7.27 Une spire carrée de côté $a = 5$ cm se déplace sur l'axe $x'x$ avec la vitesse $v = 5$ m/s. La spire est repérée par l'abscisse x de son centre M . Elle pénètre dans une zone de champ \vec{B} uniforme de valeur 0,2 T d'une largeur $2a$.

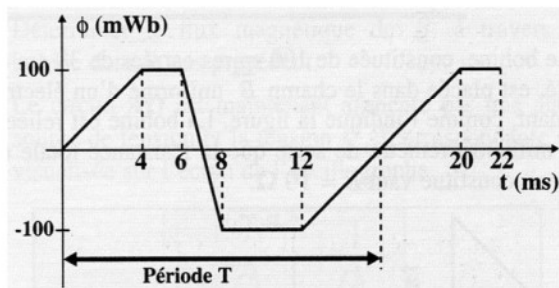
1. Calculer le flux Φ à travers la spire.



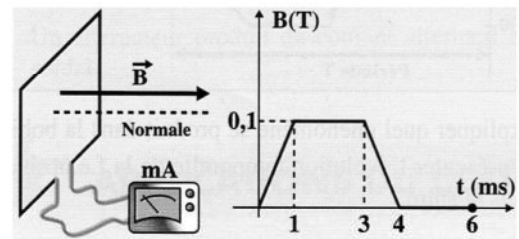
Exercice 7.23



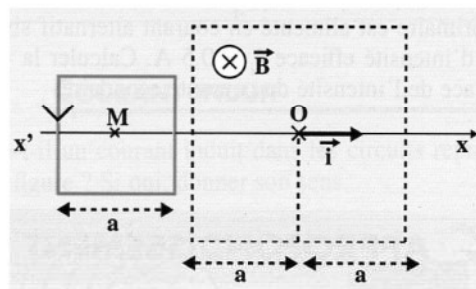
Exercice 7.24



Exercice 7.25



Exercice 7.26

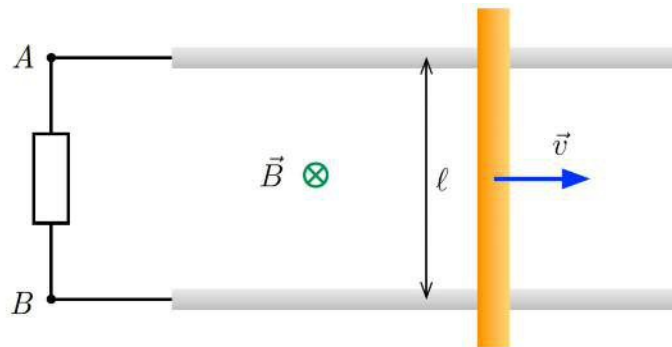


Exercice 7.27

2. Représenter l'évolution temporelle $e(t)$ de la f.é.m. induite dans la spire.
3. Représenter l'évolution spatiale $e(x)$ de la f.é.m. induite dans la spire.

Exercice 7.28 Proposer des dispositifs qui pourraient fonctionner comme alternateur.

Exercice 7.29 Une tige en cuivre se déplace à la vitesse constante \vec{v} sur des rails placés dans un champ magnétique uniforme \vec{B} . Les rails, distants de ℓ , sont reliés à une résistance.



- Expliquer pourquoi un courant induit apparaît dans le circuit. Déterminer le sens du courant.
- Appliquer la loi de Faraday pour calculer la tension U_{AB} aux bornes de la résistance en fonction de B , ℓ et v .
- Calculer la tension si $B = 200 \text{ mT}$, $v = 1,5 \text{ m/s}$ et $\ell = 10 \text{ cm}$.