

Leçon 5: Forces et champs magnétiques

ACTIVITÉ D'INTÉGRATION

Expérience 1

En un lieu donné, une aiguille aimantée, pouvant tournée dans un plan horizontal, s'oriente toujours dans la même direction et le même sens, tout comme une boussole. Si on l'écarte d'une position d'équilibre, elle reprend la même orientation après quelques oscillations : elle subit une action mécanique.

Expérience 2

Lorsque l'on approche un aimant droit de l'aiguille aimantée, son orientation change et dépend de sa position par rapport à l'aimant : elle devient sensible au champ magnétique créé par l'aimant.

En vous servant des deux expériences et de vos connaissances, répondez aux questions suivantes

- 1- Donner le rôle que joue l'aiguille aimantée.
- 2- Que peut-on dire de l'aimant droit ?
- 3- Proposer une définition du champ magnétique ?

Objectifs

- Définir : force de Laplace - champ magnétique - force de Lorentz.
- Définir champ magnétique uniforme et donner quelques dispositifs permettant de le réaliser.
- Connaître la loi de Laplace (expressions scalaire et vectorielle). Exprimer la force de Lorentz.

3.1 Les forces magnétiques

3.1.1. Expérience

Considérons deux barreaux aimantés (B_1) et (B_2) en interaction (fig. 3.1.a), puis l'action d'un aimant (B) sur la limaille de fer (fig. 3.1.b).



Figure 3.1 : Dispositif de mise en évidence

À la figure 3.1.a, les aimants se repoussent mutuellement à distance, tandis qu'à la figure 3.1.b, (B) attire à distance, la limaille de fer. Si l'on remplace la limaille de fer par la tournure de cuivre, rien ne se passe (pas d'attraction). Cela peut se justifier par le fait que, le cuivre n'est pas une substance ferromagnétique.



3.1.2. Définition

- Un **aimant** est un corps capable d'attirer le fer et ses alliages ou composés.
- Une **force magnétique** est une force à distance exercée par un aimant sur une substance ferromagnétique.
- Une **force magnétique** est aussi une force à distance exercée grâce à l'existence d'un **champ magnétique**.

Remarque

L'attraction magnétique se manifeste généralement dans deux zones de l'aimant appelées **pôles de l'aimant** à savoir le pôle nord (N) et le pôle sud (S).

3.1.3. Interaction magnétique

En chacun des points de l'espace, le champ magnétique est caractérisé par une grandeur vectorielle : le **vecteur champ magnétique** $\vec{B}$.

L'interaction magnétique peut se traduire par des forces ou des couples de forces. Étant donné qu'il existe deux sources de champ magnétique (*les aimants et les courants électriques*), on assiste alors à trois types d'interaction magnétique :

- l'interaction aimant - aimant
- l'interaction aimant - courant
- l'interaction courant - courant

3.2 Champ magnétique

3.2.1. Définition

Encore appelé **induction magnétique**, le **champ magnétique** est une propriété de toute région de l'espace à l'intérieur de laquelle un objet ferromagnétique est soumis à des forces ferromagnétiques.

3.2.2. Caractéristiques du champ magnétique $\vec{B}$

- **Direction et sens** : ils sont déterminés à l'aide d'une aiguille aimantée.

L'axe SN (Sud - Nord) de l'aiguille aimantée, indique la direction de $\vec{B}$ et le sens est orienté de S vers N.

- **Module** : il s'exprime en tesla de symbole T.

L'appareil de mesure de l'intensité de $\vec{B}$ est le **teslamètre**.

1 mT = 10^{-3} T ; 1 gauss = 10^{-4} T ; 1 μ T = 10^{-6} T ; 1 gamma = 1 nT = 10^{-9} T.

3.2.3. Le champ magnétique terrestre

Loin de toute source de champ magnétique, des aiguilles aimantées suspendues à des fils sans torsion, s'orientent toutes dans la même direction. Il existe donc un champ magnétique de direction constante dans le voisinage de ces aiguilles aimantées : c'est le **champ magnétique terrestre**.

Remarque.

- Le champ magnétique terrestre B_T varie entre 2.10^{-5} T et 7.10^{-5} T.
- Le plan vertical contenant le vecteur $\vec{B}_T$ est appelé **méridien magnétique** du milieu considéré.
- Le méridien magnétique forme avec le nord géographique (*plan vertical passant par la ligne des pôles*), un angle $\hat{D}$ appelé **déclinaison magnétique**.
- L'**inclinaison magnétique** $\hat{I}$ est l'angle entre $\vec{B}_T$ et sa composante horizontale $\vec{B}_h$.

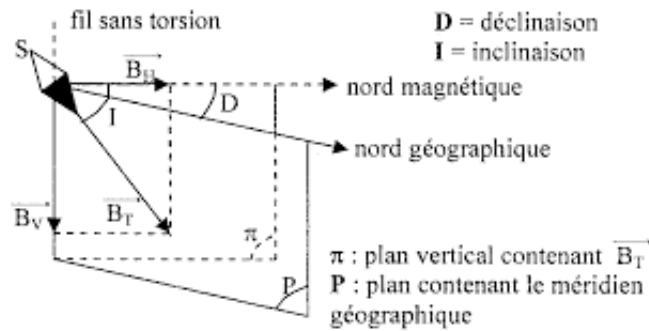


Figure 3.2 : Champ magnétique terrestre

3.2.4. Spectre magnétique

On dispose sur un rétroprojecteur, une plaquette translucide composée d'alvéoles refermant chacune une petite tige de fer aimantée. Posons un aimant droit sur cette plaquette.

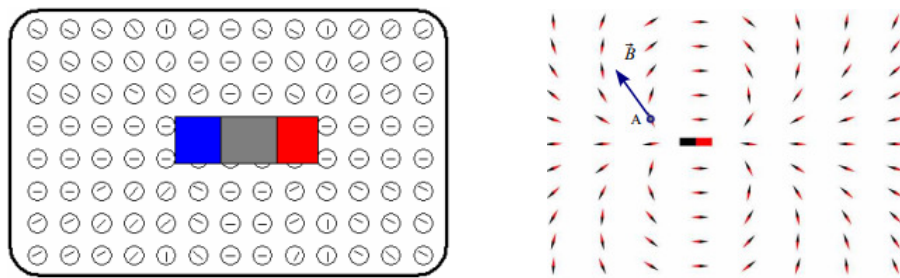


Figure 3.3 : Mise en évidence des lignes de champ magnétique d'un aimant

Les tiges aimantées se positionnent pour former des **lignes**.

- les tiges aimantées mettent en évidence les **lignes de champ magnétique** d'un aimant
- l'ensemble des lignes de champ forme le **spectre magnétique**

On appelle **ligne de champ**, une courbe qui, en chacun de ses points, est tangente au vecteur champ magnétique.

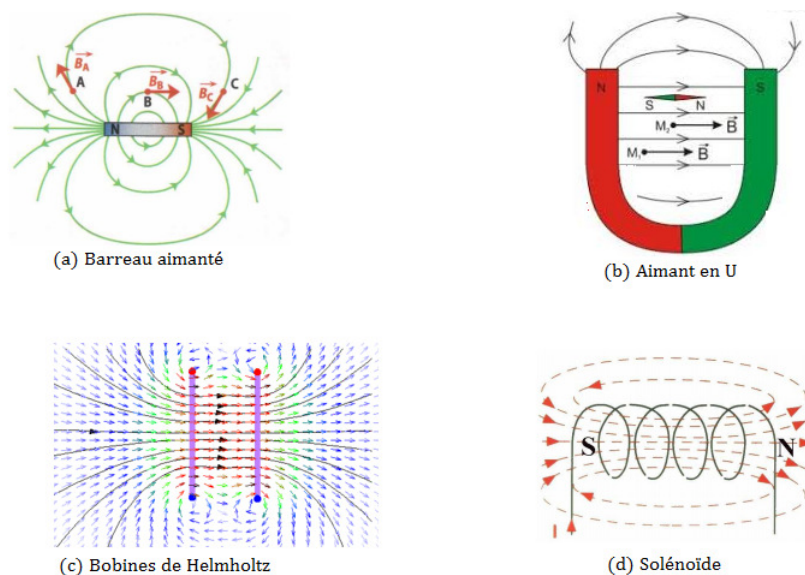


Figure 3.4 : Spectre magnétique de quelques systèmes

Les bobines de Helmholtz sont un ensemble de deux bobines plates de même rayon R et distantes de

$d = R$.

Remarque

■ À l'intérieur d'un aimant en U, les lignes de champ sont des droites parallèles : on dit que le champ magnétique est **uniforme**.

■ intensités du champ magnétique à l'intérieur de quelques bobines remarquables ayant N-spires de longueur ℓ et de rayon R parcourue par un courant d'intensité I

- Solénoïde ou bobine longue

$$B = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N \cdot I}{\ell} = \mu_0 \frac{N \cdot I}{\ell} \quad (3.1)$$

- Bobine plate

$$B = 2\pi \cdot 10^{-7} \frac{N \cdot I}{2R} \quad (3.2)$$

- Bobine de Helmholtz

$$B = 0,72\mu_0 \frac{N \cdot I}{R} = 2,88 \cdot 10^{-7} \frac{N \cdot I}{R} \quad (3.3)$$

3.3 Action d'un champ magnétique sur un élément de circuit parcourut par un courant : Force de Laplace

3.3.1. Mise en évidence de la force de Laplace

• Expérience

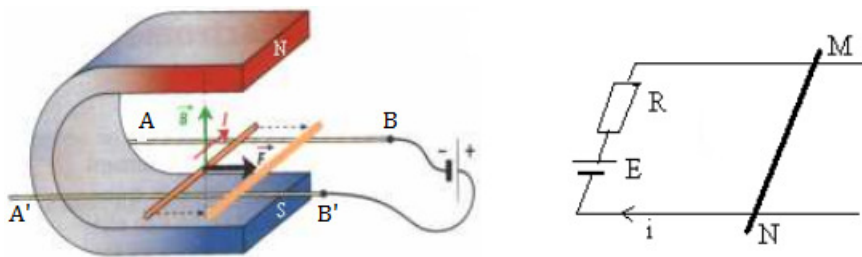


Figure 3.5 : Dispositif expérimental

Soit une barre MN en cuivre mobile sur deux rails conducteurs horizontaux AB et A'B'. La barre MN est placée entre les branches d'un aimant en U où règne un champ magnétique uniforme $\vec{B}$. Le circuit MNB'BM est alimenté par un générateur de courant continu I.

• Observation

- Dès la fermeture de l'interrupteur, MN se met en mouvement : elle est donc soumise à une force
- Le sens du mouvement de la barre s'inverse avec celui du courant I
- Le sens du mouvement de la barre s'inverse lorsqu'on inverse le sens du champ magnétique (en retournant l'aimant)
- la force exercée est toujours perpendiculaire au plan formée par la barre et le champ magnétique.

• Conclusion

Un conducteur, placé dans un champ magnétique uniforme et parcouru par un courant électrique, est soumis à une **force électromagnétique**. Le sens de cette force dépend du sens du courant et de celui du champ magnétique ; son intensité est proportionnelle à celle du courant et celle du champ magnétique : cette force électromagnétique est appelée **force de Laplace**.



3.3.2. Loi de Laplace

Une portion rectiligne conductrice de longueur ℓ , parcourue par un courant d'intensité I et placée dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$, est soumise à une force électromagnétique $\vec{F}$ dite force de Laplace, appliquée au milieu de la portion et donnée par la relation :

$$\vec{F} = I\vec{\ell} \wedge \vec{B} \quad (3.4)$$

★ Caractéristiques de $I\vec{\ell}$

Le vecteur $I\vec{\ell}$ est orienté dans le sens du courant. Sa norme est $I\ell$, où ℓ est la partie de MN plongeant dans le champ magnétique.

★ Caractéristiques de $\vec{F}$

- point d'application : $\vec{F}$ s'applique au milieu de l'élément de circuit soumis au champ magnétique
- direction : $\vec{F} \perp$ au plan formé par $I\vec{\ell}$ et $\vec{B}$
- sens : celui de $I\vec{\ell} \wedge \vec{B}$, le trièdre $(I\vec{\ell}, \vec{B}, \vec{F})$ doit être direct
- intensité : $F = BI\ell |\sin \alpha|$

(3.5)

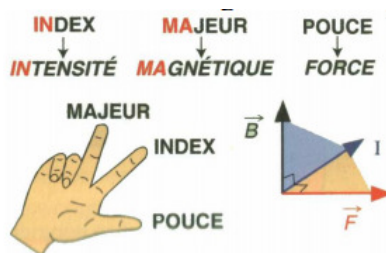
où $\alpha = (\widehat{I\vec{\ell}; \vec{B}})$, B (T), I (A), ℓ (m) et F (N).

- si $\alpha = \{0; \pi\}$, i.e. $\vec{B}$ parallèle au conducteur, alors, $F = 0$ N
- si $\alpha = \pm \frac{\pi}{2}$, i.e. $\vec{B}$ perpendiculaire au conducteur, alors,

$$F = BI\ell \quad (3.6)$$

○ Règle des trois doigts de la main droite

Elle permet de connaître les sens de $\vec{B}$, $\vec{F}$ et I. On suppose que le pouce suit la direction et le sens de I, l'index suit la direction et le sens de $\vec{B}$, le majeur suit la direction et le sens de $\vec{F}$.



Règle de la main droite : La main droite, placée dans le sens du courant, de sorte que la paume soit tournée dans le sens de $\vec{B}$, le pouce indique le sens de $\vec{F}$ et les quatre autres doigts celui de I.

Application de la force de Laplace

- balance de Cotton
- roue de Barlow (moteur électrique)
- TGV - haut parleur - sonnerie à courant électrique.

3.4 Action d'un champ magnétique sur une charge en mouvement : Force de Lorentz

La force magnétique de Lorentz s'exerce sur une particule de charge q, soumise au champ magnétique uniforme $\vec{B}$ et animée d'une vitesse $\vec{v}$, est égale à :

$$\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B} \quad (3.7)$$

Définition : La force de Lorentz est la force magnétique que subit une charge q en mouvement à la vitesse $\vec{v}$ dans une région où règne un champ magnétique $\vec{B}$.

• Caractéristiques de $\vec{F}$

- direction : $\vec{F} \perp$ au plan formé par $\vec{v}$ et $\vec{B}$



- sens : donné par le trièdre $(\vec{v}, \vec{B}, \vec{F})$.

On obtient plus facilement le sens de $\vec{F}$ grâce à la règle des trois doigts de la main droite (le pouce indique le sens de $\vec{v}$, l'index celui de $\vec{B}$ et le majeur $\vec{F}$) ou de la main gauche (la paume de la main $\vec{B}$, les 4 autres doigts $\vec{v}$ et le pouce $\vec{F}$).

Si $q > 0$ $\vec{F}$ a même sens que $\vec{v} \wedge \vec{B}$, sinon, ils sont en sens contraire.

- intensité :

$$F = |q| \cdot v \cdot B \sin \alpha \quad (3.8)$$

Si $\alpha = \pm \frac{\pi}{2}$,

$$F = |q| \cdot v \cdot B \quad (3.9)$$

• Application de la force de Lorentz

- le cyclotron (accélérateur des particules chargées)
- le spectrographe de masse (identificateur et séparateur des isotopes)
- les tubes récepteurs des TV (déviations de la trajectoire des électrons dans un champ magnétique)

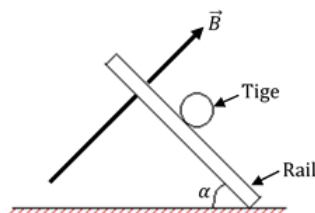
Exemple

On dispose une tige CD sur deux rails. La figure ci-dessous représente le dispositif expérimental vu de côté. Les rails sont inclinés de 30° par rapport à l'horizontal, le champ magnétique $\vec{B}$, perpendiculaire aux rails, a une intensité de 1,5 T.

On fait passer un courant électrique dans la tige CD de masse 100 g et de longueur $\ell = 10$ cm. La tige est alors en équilibre sur les rails.

Déterminer le sens et l'intensité du courant dans la tige CD

On néglige les frottements et $g = 10 \text{ m.s}^{-2}$.



Solution

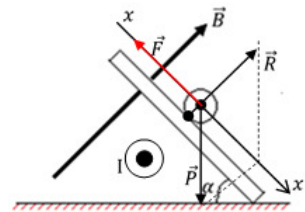
$B = 1,5 \text{ T}$; $m = 100 \text{ g}$; $\ell = 10 \text{ cm}$; $g = 10 \text{ m.s}^{-2}$

■ Sens du courant I

Déterminons en premier, le sens de $\vec{F}$, afin d'en déduire le sens de I. Bilan des forces agissant sur la tige :

- le poids $\vec{P}$

- la résultante $\vec{R}$ des réactions des rails
- la force $\vec{F}$ de Laplace



À l'équilibre, on a :

$$\vec{P} + \vec{R} + \vec{F} = \vec{0}$$

$$\text{Soit } \vec{F} = -\vec{P} - \vec{R} \quad \mathbf{z}$$

$\mathbf{z}$ montre que $\vec{F}$ est opposée à la somme $\vec{P} + \vec{R}$. Connaissant le sens de $\vec{B}$ et celui de $\vec{F}$, on en déduit, par la règle des trois doigts de la main droite, le sens sortant de I indiqué sur la figure ci-dessus.

■ Intensité de I

La projection de la relation $\mathbf{z}$ suivant xx' , nous permet d'écrire :

$$P \cdot \sin \alpha + 0 - F = 0 \Rightarrow P \cdot \sin \alpha = F$$

$$mg \sin \alpha = B \cdot I \cdot \ell \Rightarrow I = \frac{mg \cdot \sin \alpha}{B \cdot \ell}$$

$$\mathbf{AN : I = 3,33 \text{ A}}$$

Jeu bilingue

Champ électromagnétique (electromagnetic field) - force centripète (stylus drag).