

## 7-1 CHAMP MAGNÉTIQUE

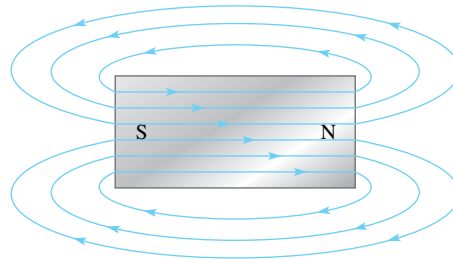
Un aimant permanent est entouré d'un champ magnétique. Le **champ magnétique** est un ensemble de **lignes de force** qui se déploient du pôle nord au pôle sud pour revenir au pôle nord par l'intérieur du matériau magnétique.

Après l'étude de cette section, vous pourrez

- ♦ **Expliquer les principes du champ magnétique**
  - ♦ Définir le flux magnétique
  - ♦ Définir la densité de flux magnétique
  - ♦ Expliquer l'aimantation des matériaux
  - ♦ Expliquer le fonctionnement d'un interrupteur magnétique

Un aimant permanent, comme le barreau aimanté de la figure 7-1, est entouré d'un champ magnétique. Tous les champs magnétiques tirent leur origine de charges en mouvement, celles-ci étant le plus souvent des électrons. Dans certains matériaux comme le fer, les atomes peuvent être alignés pour renforcer le mouvement des électrons et créer un champ observable qui s'étend sur trois dimensions. Certains isolants électriques peuvent également se comporter de cette façon. Par exemple, on peut créer d'excellents aimants avec de la céramique, quoique ce matériau soit un isolant électrique.

► **FIGURE 7-1**  
Lignes de force du champ magnétique autour d'une barre aimantée.



Les lignes bleues décrivent quelques-unes des très nombreuses lignes de force magnétiques du champ magnétique.

Le champ magnétique est composé de lignes de force ou lignes de flux qui se déploient du pôle nord (N) au pôle sud (S) et reviennent au pôle nord par l'intérieur du matériau magnétique. Pour plus de clarté, on n'a dessiné que quelques lignes sur la figure 7-1. Imaginez cependant qu'un grand nombre de lignes entourent l'aimant dans les trois dimensions. Les lignes se compriment le plus possible et se fusionnent, toutefois sans jamais se toucher. C'est ce qui crée un champ magnétique continu autour de l'aimant.

**Attraction et répulsion des pôles magnétiques** Lorsque deux pôles opposés d'aimants permanents sont rapprochés, il se développe une force d'attraction à cause des champs magnétiques, comme le montre la figure 7-2 a). La figure 7-2 b) laisse voir que lorsque deux pôles semblables sont amenés à proximité, ils se repoussent.

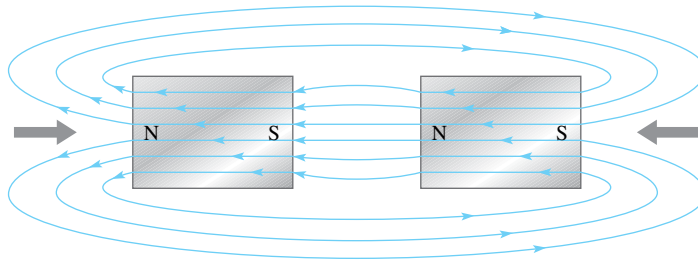
**Modification du champ magnétique** Lorsqu'un matériau non magnétique comme du papier, du verre, du bois ou du plastique est placé dans un champ magnétique, les lignes de force ne sont pas altérées, comme l'illustre la figure 7-3 a). Par contre, quand on y place un matériau magnétique comme du fer, les lignes de force cherchent à dévier de leur course et à passer dans le fer plutôt que dans l'air. Ce comportement est attribuable au fait que dans le fer, la trajectoire magnétique peut s'établir plus facilement que dans l'air. La figure 7-3 b) illustre ce principe. Le fait que les lignes de force magnétiques préfèrent traverser le fer et d'autres matériaux est à l'origine du concept des blindages qui empêchent les champs magnétiques d'affecter des circuits sensibles.

### BIOGRAPHIE

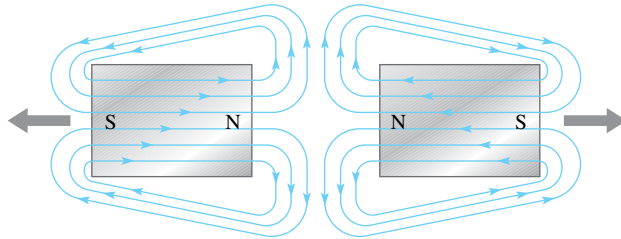


**Wilhelm  
Eduard  
Weber**  
1804–1891

Le physicien allemand Weber travailla en étroite collaboration avec Gauss, dont la biographie apparaît dans les pages suivantes. Weber créa un système d'unités électriques absolues et réalisa des travaux cruciaux dans le développement de la théorie électromagnétique de la lumière. L'unité de flux magnétique porte donc son nom en son honneur. (Photo gracieuseté de Library of Congress Prints and Photographs Division)



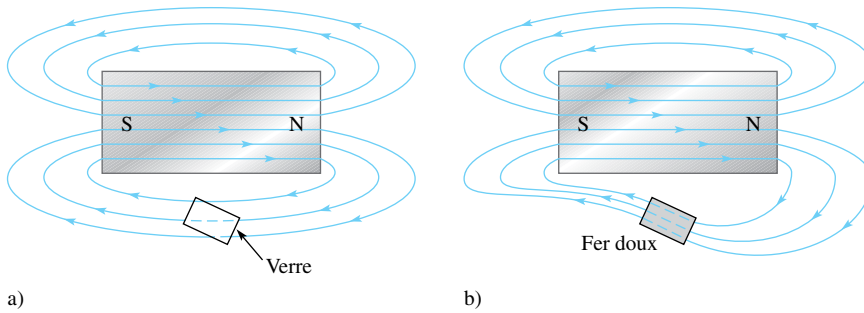
a) Les pôles opposés s'attirent.



b) Les pôles semblables se repoussent.

▲ FIGURE 7-2

Attraction et répulsion magnétiques.



▲ FIGURE 7-3

Effet des matériaux sur le champ magnétique: a) matériau non magnétique; b) matériau magnétique.

### Flux Magnétique ( $\phi$ )

Le groupe de lignes de force allant du pôle nord au pôle sud dans un aimant est appelé le **flux magnétique** et son symbole est  $\phi$  (la lettre grecque *phi* minuscule). Le nombre de lignes de force dans un champ magnétique détermine la valeur du flux. Plus les lignes de force sont nombreuses, plus le flux est important et, par conséquent, plus le champ magnétique est intense.

L'unité du flux magnétique est le **weber (Wb)**. Un weber vaut  $10^8$  lignes. Le weber désigne une très grande quantité, c'est pourquoi en pratique on fait usage du microweber ( $\mu\text{Wb}$ ). Un microweber est égal à 100 lignes de flux magnétique.

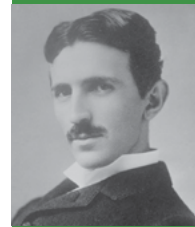
### Densité de flux magnétique ( $B$ )

La **densité de flux magnétique** est la quantité de lignes de flux par unité d'aire perpendiculaire au champ magnétique. Son symbole est  $B$  et son unité est le **tesla (T)**. Un tesla vaut un weber par mètre carré ( $\text{Wb}/\text{m}^2$ ). Voici la formule qui exprime la densité du flux :

$$B = \frac{\phi}{A}$$

où  $\phi$  désigne le flux en webers (Wb) et  $A$  l'aire de la section transversale en mètres carrés ( $\text{m}^2$ ) du champ magnétique.

### BIOGRAPHIE



Nikola Tesla  
1856–1943

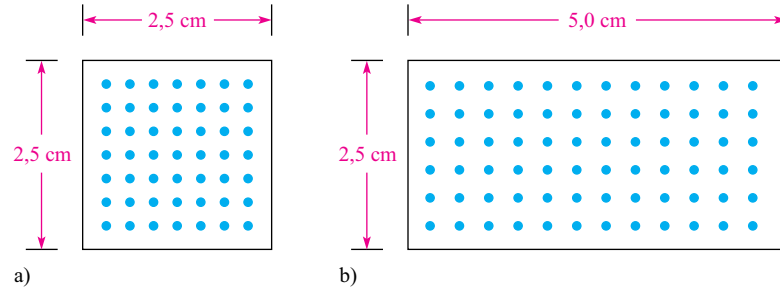
Tesla est né en Croatie (Autriche-Hongrie). Ingénieur en électricité, on lui doit le moteur à induction c.a., les systèmes c.a. polyphasés, le transformateur à bobine Tesla, les communications sans fil et les lampes fluorescentes. Lorsqu'il arriva aux États-Unis en 1884, il travailla pour Edison, puis pour Westinghouse. L'unité de densité du flux magnétique du SI porte son nom en son honneur. (Photo graciously provided by Library of Congress Prints and Photographs Division)

Équation 7-1

## EXEMPLE 7-1

Comparez le flux et la densité de flux dans les deux noyaux magnétiques illustrés à la figure 7-4. Le schéma montre la section transversale d'un matériau magnétisé. Supposez que chaque point représente 100 lignes ou  $1,0 \mu\text{Wb}$ .

► FIGURE 7-4



**Solution** Le flux équivaut simplement au nombre de lignes. À la figure 7-4 a), on compte 49 points. Comme chacun d'eux représente  $1,0 \mu\text{Wb}$ , le flux vaut donc  $49 \mu\text{Wb}$ . À la figure 7-4 b), il y a 72 points, donc le flux est de  $72 \mu\text{Wb}$ .

Pour calculer la densité de flux, il faut d'abord calculer la surface en  $\text{m}^2$ . À la figure 7-4 a), la surface mesure

$$A = \text{longueur} \times \text{largeur} = 0,025 \text{ m} \times 0,025 \text{ m} = 6,25 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

À la figure 7-4 b), la superficie est de

$$A = \text{longueur} \times \text{largeur} = 0,025 \text{ m} \times 0,050 \text{ m} = 1,25 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Utilisez l'équation 7-1 pour calculer la densité de flux. À la figure 7-4 a), la densité de flux vaut

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{49 \mu\text{Wb}}{6,25 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 78,4 \times 10^{-3} \text{ Wb/m}^2 = 78,4 \times 10^{-3} \text{ T}$$

À la figure 7-4 b), la densité de flux est de

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{72 \mu\text{Wb}}{1,25 \times 10^{-3} \text{ m}^2} = 57,6 \times 10^{-3} \text{ Wb/m}^2 = 57,6 \times 10^{-3} \text{ T}$$

Les données du tableau 7-1 comparent les deux noyaux. Notez que le noyau ayant le plus grand flux ne possède pas nécessairement la densité de flux la plus élevée.

► TABLEAU 7-1

	FLUX (Wb)	AIRE ( $\text{m}^2$ )	DENSITÉ DE FLUX (T)
Figure 7-4 a):	$49 \mu\text{Wb}$	$6,25 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	$78,4 \times 10^{-3} \text{ T}$
Figure 7-4 b):	$72 \mu\text{Wb}$	$1,25 \times 10^{-3} \text{ m}^2$	$57,6 \times 10^{-3} \text{ T}$

**Exercice connexe\*** Quelle est la densité de flux si on retrouve le même flux que celui à la figure 7-4 a), mais dans un noyau de  $5,0 \text{ cm} \times 5,0 \text{ cm}$ ?

\*Les réponses sont données à la fin du chapitre.

**EXEMPLE 7-2**

Si la densité de flux d'un certain matériau magnétique est de 0,23 T et que l'aire de ce matériau mesure 0,38 po<sup>2</sup>, calculez le flux traversant le matériau.

**Solution** Vous devez d'abord convertir 0,38 po<sup>2</sup> en mètres carrés. Sachant que 1,0 m vaut 39,37 po,

$$A = 0,38 \text{ po}^2 [1,0 \text{ m}^2 / (39,37 \text{ po})^2] = 245 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

Le flux à travers le matériau est donc

$$\phi = BA = (0,23 \text{ T})(245 \times 10^{-6} \text{ m}^2) = \mathbf{56,4 \mu\text{Wb}}$$

**Exercice connexe** Calculez  $B$  si  $A = 0,05 \text{ po}^2$  et que  $\phi = 10 \mu\text{Wb}$ .

**Le gauss** Bien que le Tesla (T) soit l'unité du SI pour la densité du flux magnétique, on utilise parfois une autre unité du système CGS (centimètre-gramme-seconde) appelée le **gauss**. Dix mille gauss équivalent à un tesla ( $10^4 \text{ gauss} = 1 \text{ T}$ ). En fait, l'appareil qui sert à mesurer la densité d'un flux magnétique s'appelle un gaussmètre. La figure 7-5 illustre un gaussmètre type. Ce gaussmètre particulier est un instrument portable à quatre gammes pouvant mesurer des champs magnétiques aussi petits que celui de la Terre (d'environ 0,5 G), de même que des champs très puissants générés par des appareils d'imagerie par résonance magnétique (d'environ 10 000 G). Comme le gauss est une unité encore couramment utilisée, vous devez bien la connaître, tout comme le tesla.

On utilise généralement un gaussmètre comme celui illustré à la figure 7-5 pour mesurer les champs magnétiques de composants comme des relais, des solénoïdes et des électro-aimants. L'utilisateur doit d'abord effectuer une mise à zéro de l'appareil à l'aide des boutons de réglage à cet effet, tout en tenant la sonde à l'écart des champs et matériaux magnétiques pendant l'ajustement. L'utilisateur peut ensuite placer la sonde dans le champ magnétique à mesurer et sélectionner la gamme sur l'appareil. Une sonde transversale doit être orientée de façon que le côté plat soit perpendiculaire au champ. D'autre part, une sonde axiale peut être insérée dans une bobine en positionnant son axe en parallèle avec le champ magnétique. De cette façon, le petit capteur à effet Hall à l'extrémité sera perpendiculaire au champ.



◀ **FIGURE 7-5**  
Gaussmètre c.c.

## HISTORIQUE



Karl  
Friedrich  
Gauss  
1777–1855

Célèbre mathématicien allemand, Gauss démontra la fausseté de nombreuses théories mathématiques du XVIII<sup>e</sup> siècle. Il travailla ensuite avec Weber sur un système de stations à l'échelle globale conçu pour l'observation systématique du magnétisme terrestre. C'est grâce à ses travaux en électromagnétisme que d'autres purent ensuite développer la télégraphie. L'unité de densité du flux magnétique du système CGS porte son nom en son honneur. (Photo gracieuseté de Cci/Shutterstock)

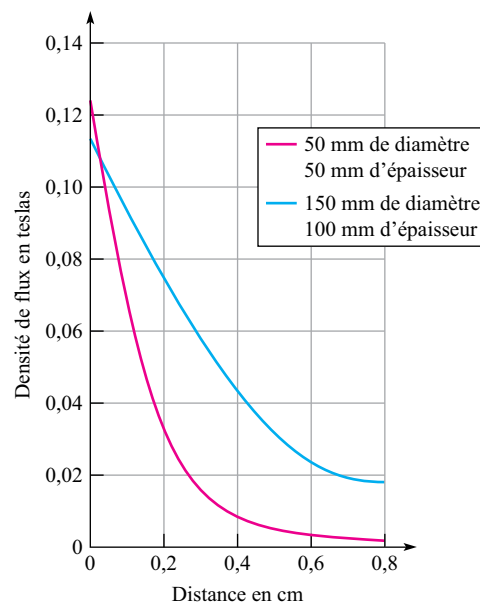
## Comment les matériaux deviennent aimantés

Les matériaux ferromagnétiques comme le fer, le nickel et le cobalt s'aimantent quand on les place dans le champ magnétique d'un aimant. Nous avons tous déjà observé un aimant permanent soulever des trombones, des clous ou de la limaille de fer. Dans ces cas, les objets deviennent aimantés (en fait, ils se transforment eux-mêmes en aimants) sous l'influence du champ magnétique et sont alors attirés par l'aimant. Lorsque le champ magnétique est retiré, les objets ont tendance à perdre leur aimantation.

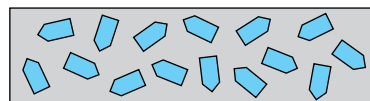
Le matériau magnétique affecte non seulement la densité du flux aux pôles, mais aussi la manière dont cette densité de flux diminue quand la distance aux pôles augmente. La taille physique affecte également la densité du flux. Par exemple, deux aimants en forme de disque fabriqués en Alnico fritté auront des densités de flux très similaires près des pôles, mais le plus gros aimant affichera une densité de flux beaucoup plus élevée à mesure que l'on s'éloigne du pôle, comme l'illustre la figure 7-6. Notez comment la densité de flux chute rapidement à mesure que l'on s'éloigne d'un pôle. Ce type de graphique permet d'évaluer si un aimant donné fera l'affaire dans une application spécifique qui dépend de la distance à laquelle l'aimant doit travailler.

► FIGURE 7-6

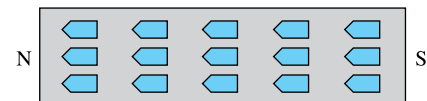
Exemple de densité de flux magnétique en fonction de la distance pour deux aimants à disque. La courbe bleue représente l'aimant le plus grand.



Les matériaux ferromagnétiques sont le siège de minuscules domaines magnétiques qui sont créés dans leur structure atomique par le mouvement orbital et le tournement des électrons. Ces domaines peuvent être imaginés comme de très petits aimants munis de pôles nord et sud. Lorsque le matériau n'est pas exposé à un champ magnétique externe, les domaines magnétiques sont orientés au hasard, comme l'illustre la figure 7-7 a). Lorsque le matériau est placé dans un champ magnétique, les domaines sont tous alignés, comme le montre la figure 7-7 b). L'objet devient donc un aimant lui-même.



a) Les domaines magnétiques (N ◀ S) sont orientés au hasard dans un matériau non aimanté.



b) Les domaines magnétiques s'alignent quand un matériau est aimanté.

▲ FIGURE 7-7

Domaines ferromagnétiques dans a) un matériau non aimanté et b) un matériau aimanté.

SOURCE	DENSITÉ DE FLUX TYPE EN TESLAS (T)
Champ magnétique terrestre	$4 \times 10^{-5}$ (varie selon l'endroit)
Petits aimants pour réfrigérateurs	0,08 à 0,1
Aimants en céramique	0,2 à 0,3
Aimant pour interrupteur à lames en Alnico	0,1 à 0,2
Aimants en néodyme	0,3 à 0,52
Imagerie par résonance magnétique	1,5
Champ magnétique le plus puissant jamais atteint en laboratoire	45,5

▲ TABLEAU 7-2

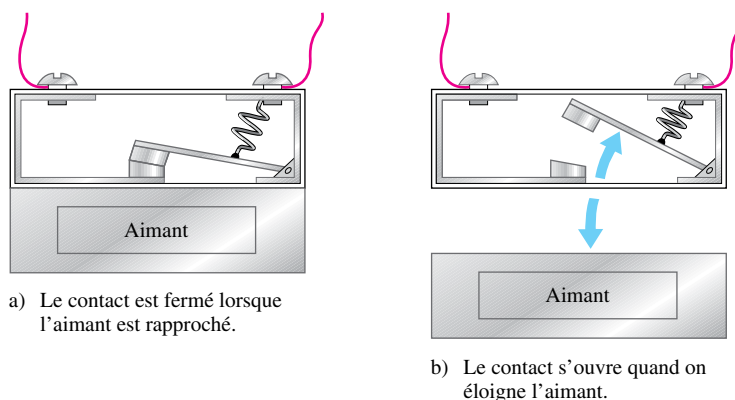
### Densité de flux de divers champs magnétiques.

Le type de matériau est un paramètre important pour la densité de flux réelle des aimants. Le tableau 7-2 énumère les densités de flux de champs magnétiques types. Pour les aimants permanents, les chiffres montrés sont basés sur la densité de flux du champ normalement mesurée près du pôle. Comme nous l'avons vu plus tôt, ces valeurs peuvent chuter de manière significative à mesure que l'on s'éloigne des pôles. Le champ le plus fort auquel la plupart des gens seront confrontés dans leur vie est d'environ 1,5 T (15 000 G) s'ils subissent un examen d'imagerie par résonance magnétique. Les aimants permanents les plus puissants disponibles commercialement sont ceux en composite néodyme-fer-bore (souvent abrégé par NdFeB ou NIB), comme ceux des disques durs d'ordinateurs. Pour obtenir une densité de flux en gauss, il suffit de multiplier la valeur en teslas par  $10^4$  (10 000).

### Exemple d'applications

On ne compte plus les applications (étudiées dans la section 7-7) qui emploient des aimants permanents. Celle qui nous intéresse est illustrée à la figure 7-8. Il s'agit d'un interrupteur à commande magnétique de type normalement fermé. Lorsqu'un aimant s'approche du mécanisme d'interruption, le bras métallique est maintenu en position fermée, comme le montre la partie a). La partie b) de la figure illustre que lorsqu'on éloigne l'aimant, le ressort tire sur le bras et ouvre le contact.

Une autre application importante des aimants permanents concerne les capteurs qui tirent parti de l'**effet Hall**. L'effet Hall désigne la création d'une petite tension (de l'ordre de quelques  $\mu\text{V}$ ) aux bornes d'un conducteur ou d'un semi-conducteur mince (l'élément Hall)



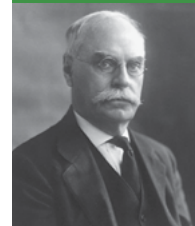
▲ FIGURE 7-8

### Fonctionnement d'un interrupteur magnétique.



De nombreux aimants puissants sont très fragiles et peuvent se briser en cas d'impact. Portez toujours des lunettes de protection lorsque vous travaillez avec des aimants de grande force. Comme ces composants ne sont pas des jouets, il ne faut pas laisser des enfants les manipuler. De même, les personnes portant un stimulateur cardiaque doivent se tenir à l'écart de champs magnétiques puissants.

### BIOGRAPHIE



Edwin  
Herbert Hall  
1855–1938

L'effet Hall a été découvert par Edwin Albert Hall en 1879 alors qu'il travaillait sur sa thèse de doctorat en physique à l'université Johns Hopkins. Les expériences de Hall consistaient à exposer une fine feuille d'or sur une plaque de verre à un champ magnétique et à accéder à des points de connexion le long de cette feuille. Après avoir appliqué un courant à travers la feuille d'or, Hall mesura une petite tension à travers les points de connexion. La production de tension à travers un conducteur ou un semi-conducteur soumis à un champ magnétique est appelée l'effet Hall en son honneur.

(Photo gracieuseté de Signal Photos/Alamy Stock Photo)