

Dans le cadre de notre hobby, les bobinages tiennent une place importante. On peut en effet en retrouver à tous les étages d'une chaîne d'émission-réception. Un bobinage est caractérisé électriquement par son inductance, cette inductance étant elle-même une caractéristique des phénomènes d'induction mutuelle et d'auto-induction. L'objet de cet article est de rap-peler quelques notions importantes relatives à ce phénomène d'induction.

## 1. L'electromagnetisme

### 1.1. L'expérience d'Oersted

Les aimants naturels (minerai de fer  $Fe_3O_4$ ) étaient connus depuis l'antiquité, de par leur propriété d'exercer une force d'attraction sur d'autres objets en fer. La boussole, une application de ces aimants naturels, était utilisée depuis longtemps déjà par les chinois. Depuis l'invention de la pile par Volta en 1800, il était possible de faire passer un courant électrique dans un conducteur. Cependant, électricité et magnétisme apparaissaient comme deux domaines étanches l'un par rapport à l'autre.

**Hans Christian ØRSTED (1777–1851).**

Physicien et chimiste danois. (source: Wikipedia)

Hans Christian ØRSTED (1777–1851).

Deens natuurkundige en chemicus (bron: Wikipedia)



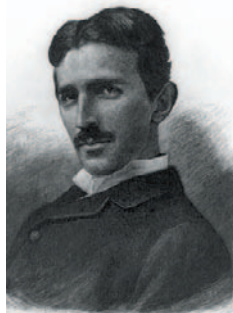
C'est en 1819 que le physicien danois Hans Christian Oersted découvrit, au cours d'une leçon donnée à l'université de Copenhague sur les effets calorifiques du courant électrique, l'influence magnétique due au passage du courant dans un fil sur l'aiguille aimantée d'une boussole. La **figure 1** illustre cette expérience qui fut le point de départ de tout l'électromagnétisme. Le passage du courant dans le conducteur exerce sur l'aiguille aimantée de la boussole, une influence identique à celle qu'exercerait un aimant naturel placé dans le voisinage de cette boussole.

### 1.2. Champ magnétique

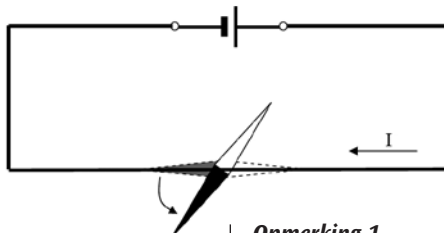
Pour faire dévier l'aiguille de la boussole, il faut qu'une force s'exerce sur elle. Il faut donc que le passage du courant dans le fil conducteur produise dans l'espace environnant, un champ de force que l'on appelle champ magnétique (ou induction magnétique) et que l'on désigne par  $\vec{B}$ . La flèche au-dessus de la lettre B indique que le champ magnétique est une grandeur vectorielle, c'est-à-dire qu'elle possède une intensité, une direction et un sens. L'intensité du champ magnétique est exprimée en **Tesla**, en hommage à l'ingénieur américain d'origine serbe, Nicholas Tesla.

**Nicholas TESLA (1856–1943).**

Ingénieur américain d'origine serbe. (source: Wikipedia)



**Fig. 1. L'expérience d'Oersted.** L'aiguille aimantée d'une boussole, préalablement disposée parallèlement au fil conducteur, est déviée lors du passage du courant I. L'aiguille de la boussole se trouve dans un plan horizontal sous le conducteur.



#### Remarque 1

Le tesla peut être relié aux unités fondamentales (kg, m, s, A) par l'intensité  $F$  de la force qui s'exerce sur une charge électrique  $q$  se déplaçant à la vitesse  $v$  dans un champ magnétique d'intensité  $B$ . La direction de la force  $\vec{F}$  est perpendiculaire au plan défini par les vecteurs vitesse  $\vec{v}$  et champ magnétique  $\vec{B}$ . Dans le cas où la charge électrique se déplace dans une direction perpendiculaire à celle du champ magnétique, l'intensité de la force qui s'exerce sur la charge est donnée par la relation  $F=qvB$ .

In het kader van onze hobby spelen spoelen een belangrijke rol. Je vindt ze terug op alle niveaus van een zendontvangstketen. Op elektrisch gebied wordt een spoel gekenmerkt door zijn inductantie, op haar beurt een kenmerk van de verschijnselen wederzijdse inductie en zelfinductie. In dit artikel worden enkele belangrijke begrippen over het inductieverschijnsel opgefrist.

## 1. Elektromagnetisme

### 1.1. De proef van Oersted

Natuurlijke magneten (ijzererts  $Fe_3O_4$ ) waren al vanaf de Oudheid bekend om hun eigenschap een aantrekkingskracht uit te oefenen op andere ijzeren voorwerpen. Een van de toepassingen van natuur-

lijke magneten, het kompas, werd door de Chinezen al lang geleden gebruikt. De uitvinding van de batterij door Volta in 1800 maakte het mogelijk om een stroom door een geleider te sturen. Maar elektriciteit en magnetisme werden beschouwd als volledig van elkaar gescheiden domeinen.

**Alessandro VOLTA (1745–1827).**

Physicien et chimiste italien. (source: Wikipedia)

Alessandro VOLTA (1745–1827).

Italiaans natuurkundige en chemicus (bron: Wikipedia)



In 1819 ontdekte de Deense natuurkundige Hans Christian Oersted, tijdens een les aan de universiteit van Kopenhagen over de warmte-effecten van de elektrische stroom, de magnetische invloed van een door een elektrische draad vloeiende stroom op de magneetnaald van een kompas. Deze proef – uitgangspunt van het elektromagnetisme – wordt geïllustreerd in **figuur 1**. De stroom door de geleider oefent op de magnetische kompasnaald dezelfde invloed uit als die van een natuurlijke magneet die in de nabijheid van het kompas wordt geplaatst.

### 1.2. Magnetisch veld

Om de kompasnaald te doen uitwijken, moet een kracht op de naald uitgeoefend worden. De stroom door de geleidende draad moet dus een krachtveld in de omliggende ruimte opwekken. Dit krachtveld wordt het magnetisch veld (of magnetische inductie) genoemd, voorgesteld door  $\vec{B}$ . Het pijltje boven de letter B beduidt dat het magnetisch veld een vectorgrootheid is: zij heeft een sterkte, een richting en een zin. De sterkte van het magnetische veld wordt uitgedrukt in **tesla**, als eerbetoon aan Nicholas Tesla, de Amerikaanse, uit Servië afkomstige ingenieur.

**Nicholas TESLA (1856–1943).**

Amerikaans ingenieur afkomstig uit Servië (bron: Wikipedia)

**Fig. 1. De proef van Oersted.** De magneetnaald van een kompas, aanvankelijk evenwijdig met de geleidende draad, wijkt af wanneer er een stroom I vloeit. De magneetnaald bevindt zich in een horizontaal vlak onder de geleider.

#### Opmerking 1

De tesla kan worden gekoppeld aan de fundamentele eenheden (kg, m, s, A) door de sterkte  $F$  van de kracht uitgeoefend op een elektrische lading  $q$  die zich met een snelheid  $v$  verplaatst in een magnetisch veld met sterkte  $B$ . De richting van de kracht  $\vec{F}$  staat loodrecht op het vlak bepaald door de vectoren snelheid  $\vec{v}$  en magnetisch veld  $\vec{B}$ . In het geval waarbij de elektrische lading zich verplaatst in een richting loodrecht op de richting van het magnetisch veld, wordt de sterkte van de kracht uitgeoefend op de elektrische lading

Le tesla est alors l'intensité du champ magnétique exerçant une force de un newton sur une charge électrique de un coulomb se déplaçant à une vitesse de un mètre par seconde, dans une direction perpendiculaire au champ magnétique. A titre d'exemple, le champ magnétique terrestre (à la surface de la terre) est de l'ordre de  $50 \mu\text{T}$  ( $50 \cdot 10^{-6} \text{T}$ ). Une application de cette force est la déviation du faisceau d'électrons dans un tube cathodique de téléviseur.

Dans le cas d'un très long conducteur rectiligne plongé dans l'air et dans lequel circule un courant  $i$ , l'intensité du champ magnétique à une distance  $r$  du fil vaut (voir le point 1.3 pour la direction de  $\vec{B}$ ):

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \quad (1)$$

Dans la relation (1),  $\mu_0$  est la perméabilité du vide et vaut  $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{weber}}{\text{ampère} \cdot \text{mètre}}$  (la définition du weber est donnée au point 1.4).

### Remarque 2

En toute rigueur, dans la relation (1), il faudrait utiliser la perméabilité de l'air. Comme celle-ci est pratiquement égale à celle du vide, nous utiliserons par la suite  $\mu_0$  au lieu de  $\mu_{\text{air}}$  lorsque le milieu ambiant est de l'air.

### Exemple 1

Un conducteur rectiligne très long est le siège d'un courant de 1 A. Que vaut le champ magnétique à 10 cm du conducteur?

### Solution

L'application de la relation (1) donne:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}{2 \cdot \pi \cdot 0,1} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ tesla, soit } 2 \mu\text{T}.$$

### 1.3. Lignes de force du champ magnétique

Le champ magnétique est caractérisé dans l'espace par ses lignes de force. Ce sont des courbes qui sont en tout point tangentes à la direction du champ magnétique. La figure 2 donne un exemple de lignes de force avec un aimant permanent. Dans le cas d'un conducteur rectiligne, les lignes de force sont des cercles centrés sur le fil et dont les plans sont perpendiculaires au fil (figure 3).

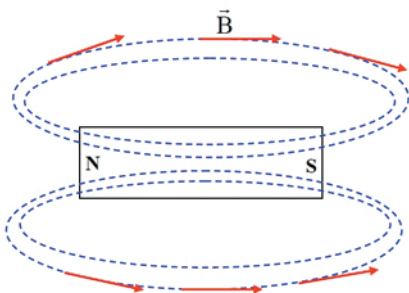
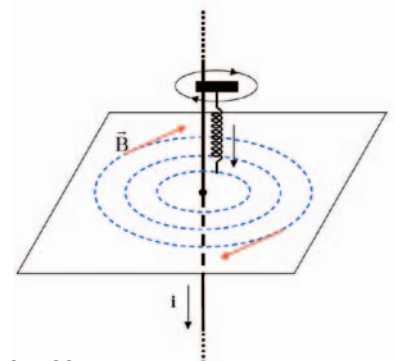


Fig. 2. Lignes de force du champ magnétique d'un aimant permanent. Les lignes de force "rentrent" par le pôle sud de l'aimant et "ressortent" par son pôle nord. Les flèches indiquent la direction du champ magnétique au point considéré.

Fig. 2. Krachtlijnen van het magnetisch veld van een permanente magneet. De lijnen 'komen binnen' langs de zuidelijke pool van de magneet en 'verlaten' de magneet aan zijn noordelijke pool. De pijltjes geven de richting van het magneetveld aan in dat punt.

Fig. 3. Lignes de force du champ magnétique produit par un courant circulant dans un conducteur rectiligne. La direction du champ magnétique est donnée par le sens de rotation d'un tire-bouchon s'enfonçant dans le sens du courant.

Fig. 3. Krachtlijnen van het magnetisch veld veroorzaakt door een stroom in een rechtlijnige geleider. De richting van het magnetisch veld stemt overeen met draaizin van een kurkentrekker die in de stroomzin wordt ingedraaid.



### 1.4. Flux du champ magnétique

Considérons une surface  $S$  plongée dans un champ magnétique  $\vec{B}$  uniforme; la surface  $S$  est supposée perpendiculaire à  $\vec{B}$  (figure 4). Le flux  $\varphi$  du champ magnétique  $\vec{B}$  à travers la surface  $S$  vaut (dans ce cas précis où  $\vec{B}$  est perpendiculaire à  $S$ ):

$$\varphi = BS \quad (2)$$

Le flux s'exprime en weber en hommage au physicien allemand Wilhelm E. Weber. Le **weber** est donc le flux d'un champ magnétique de un tesla à travers une surface de un mètre carré perpendiculaire à la direction du champ magnétique.

gegeven door de verhouding  $F=qvB$ . De tesla is dan de sterkte van het magnetisch veld dat een kracht van 1 newton uitoefent op een elektrische lading van 1 coulomb die zich verplaatst met een snelheid van 1 meter per seconde in een richting loodrecht op het magnetisch veld. Bij wijze van voorbeeld: de aardmagnetische veldsterkte is (aan het aardoppervlak) ongeveer  $50 \mu\text{T}$  ( $50 \cdot 10^{-6} \text{T}$ ). De afwijking van de elektronenbundel in de kathodestraalbuis van een televisietoestel is een toepassing van dit veld.

In het geval van een zeer lange, rechtlijnige geleider in de lucht, waardoor een stroom  $i$  vloeit, is de magnetische veldsterkte op een afstand  $r$  van de draad (zie punt 1.3 voor de richting van  $\vec{B}$ ):

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \quad (1)$$

In de formule (1) is  $\mu_0$  de permeabiliteit van het luchtledige, met waarde  $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{weber}}{\text{ampère} \cdot \text{mètre}}$  (de definitie van de weber wordt in punt 1.4 gegeven).

### Opmerking 2

Strikt gezien moet in formule 1 de permeabiliteit van lucht gebruikt worden. Deze is nagenoeg gelijk aan de permeabiliteit van het luchtledige. Daarom gebruiken we verder  $\mu_0$  in plaats van  $\mu_{\text{air}}$  als het een luchtomgeving betreft.

### Voorbeeld 1

Door een zeer lange, rechtlijnige geleider vloeit een stroom van 1 A. Wat is de magnetische veldsterkte op 10 cm van de geleider?

### Oplossing

Uitwerking van de formule (1) geeft:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}{2 \cdot \pi \cdot 0,1} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ tesla, of } 2 \mu\text{T}.$$

### 1.3. Veldsterketlijnen van het magnetisch veld

Het magnetisch veld wordt in de ruimte gekenmerkt door zijn veldsterketlijnen. Het zijn krommen die in elk punt raken aan de richting van het magnetisch veld. Figuur 2 toont een voorbeeld van de veldsterketlijnen van een permanente magneet. In het geval van een rechtlijnige geleider vormen de veldsterketlijnen cirkels rond de geleider in vlakken loodrecht op de geleider (figuur 3).

### 1.4. Flux van een magnetisch veld

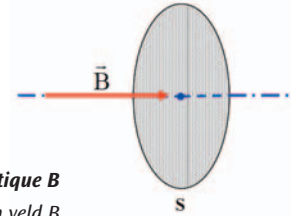
Beschouwen we een vlak  $S$  geplaatst binnen een eenvormig magnetisch veld  $\vec{B}$ ; het vlak  $S$  wordt verondersteld loodrecht op  $\vec{B}$  te staan (figuur 4). In dit specifieke geval ( $\vec{B}$  loodrecht op  $S$ ) is de flux  $\varphi$  van het magnetisch veld  $\vec{B}$  doorheen het vlak  $S$ :

$$\varphi = BS \quad (2)$$

De flux wordt uitgedrukt in **weber**, uit eerbetoon aan de Duitse natuurkundige Wilhelm E. Weber. De weber is bijgevolg de flux van een magnetisch veld van 1 tesla doorheen een vlak van 1 vierkante meter, loodrecht op de richting van het magnetisch veld.



**Wilhelm Eduard WEBER (1804–1891).**  
*Physicien allemand. (source: Wikipedia)*  
 Wilhelm Eduard WEBER (1804–1891).  
*Duits fysicus (bron: Wikipedia)*



**Fig. 4. Une surface  $S$  perpendiculaire au champ magnétique  $B$**   
*Fig. 4. Een oppervlak  $S$  loodrecht op het magnetisch veld  $B$*

**1.5. Champ magnétique d'un courant circulaire**

Si nous déformons un conducteur pour lui donner la forme d'un cercle, nous obtenons une spire (figure 5). Dans ce cas, les différentes contributions au champ magnétique se renforcent à l'intérieur de la spire et s'atténuent à l'extérieur. En tout point  $P$  de l'axe de la spire, le champ magnétique  $\vec{B}$  est orienté suivant cet axe. Son sens est donné par le sens dans lequel s'enfonce un tire-bouchon placé sur l'axe et tournant dans le sens du courant. On peut montrer que l'intensité de ce champ magnétique est donné, pour un courant  $i$ , par:

$$B = \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (3)$$

Dans cette relation,  $R$  est le rayon de la spire et  $x = \overline{OP}$  est la distance du centre  $O$  de la spire au point  $P$ . Au centre  $O$  de la spire ( $x = 0$ ), l'intensité du champ magnétique vaut:

$$B_0 = \frac{\mu_0 i}{2R} \quad (4)$$

**Exemple 2**

Une spire de rayon  $R = 10$  cm est le siège d'un courant  $i = 1$  A. Calculer le champ magnétique au centre de la spire.

**Solution**

L'application de la relation (4) donne:

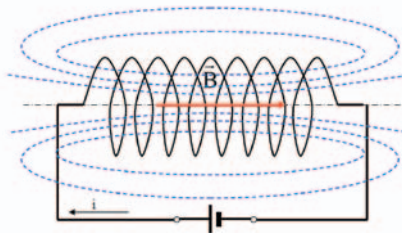
$$B_0 = \frac{\mu_0 i}{2R} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}{2 \cdot 0,1} = 6,28 \cdot 10^{-6} \text{ tesla, soit } 6,28 \mu\text{T}.$$

**1.6. Champ magnétique dans un solénoïde**

Un solénoïde est un circuit composé de spires circulaires coaxiales de même rayon, parcourues par le même courant. Pratiquement, on réalise un solénoïde en enroulant à spires jointives, un fil conducteur sur un support isolant (figure 6). Le long de l'axe du solénoïde, le champ magnétique  $\vec{B}$  est orienté suivant cet axe et est la résultante des champs produits par les différentes spires du solénoïde. Pour un très long solénoïde (longueur  $\gg \gg$  diamètre), le champ à l'intérieur est pratiquement uniforme dans la région centrale. Pour un courant  $i$  et en appelant  $n$  le nombre de spires par unité de longueur, le champ au centre est donné par:

$$B = \mu_0 n i \quad (5)$$

**Fig. 6. Lignes de force du champ magnétique dans un solénoïde. Les contributions magnétiques des différentes spires s'ajoutent à l'intérieur du solénoïde. Dans la partie centrale d'un très long solénoïde, le champ magnétique est pratiquement uniforme.**



Dans les conditions citées ci-dessus, le champ magnétique ne dépend donc que du courant  $i$  et du nombre  $n$  de spires par unité de longueur. Aux extrémités du solénoïde, l'intensité du champ magnétique sur l'axe ne vaut plus que la moitié de ce qu'elle vaut au centre.

**1.5. Het magnetisch veld van een circulaire stroom**

Als we een geleider ombuigen tot een cirkel, bekommen we een winding (figuur 5). In dit geval worden de verschillende bijdragen aan het magnetisch veld binnen de spoel versterkt en buiten de spoel verzwakt. In elk punt  $P$  op de as van de spoel is het magnetisch veld  $\vec{B}$  langs deze as gericht. De zin van het magnetisch veld komt overeen met de draaizin van een kurkentrekker die op de as in de draaizin van de stroom wordt ingedraaid. Er kan worden aangetoond dat de sterkte van dit magnetisch veld, voor een stroom  $i$ , wordt bepaald door:

$$B = \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (3)$$

Hierin is  $R$  de straal van de winding en  $x = \overline{OP}$  de afstand van het midden  $O$  van de spoel tot het punt  $P$ . In het centrum  $O$  van de winding ( $x = 0$ ) is de sterkte van het magnetisch veld:

$$B_0 = \frac{\mu_0 i}{2R} \quad (4)$$

**Voorbeeld 2**

Door een winding met straal  $R = 10$  cm loopt een stroom  $i = 1$  A. Bereken het magnetisch veld in het centrum van de winding.

**Oplossing**

Uitwerking van de formule (4) geeft:

$$B_0 = \frac{\mu_0 i}{2R} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}{2 \cdot 0,1} = 6,28 \cdot 10^{-6} \text{ tesla, of } 6,28 \mu\text{T}.$$

**1.6. Het magnetisch veld in een solenoïde**

Een solenoïde is een geheel van cirkelvormige coaxiale windingen met eenzelfde straal, doorlopen door dezelfde stroom. In de praktijk bekomt men een solenoïde door een geleidende draad op te rollen in opeenvolgende windingen op een isolerende houder (figuur 6). Langs de as van de solenoïde ontstaat een magnetisch veld dat het resultaat is van de magnetische velden van de verschillende windingen. Bij een erg lange solenoïde (lengte  $\gg \gg$  diameter), is het magnetisch veld binnen de solenoïde in het centraal gedeelte nagenoeg eenvormig. Voor een stroom  $i$  en met  $n$  als het aantal windingen per lengte-eenheid, wordt het veld in het centrum bepaald door:

$$B = \mu_0 n i \quad (5)$$

**Fig. 6. De magnetische veldsterktelijnen in een solenoïde. De veldsterkte van de verschillende windingen worden binnenin de solenoïde samengevoegd. In het centraal gedeelte van een zeer lange solenoïde is het magneetveld praktisch eenvormig.**

Onder de hierbovenvermelde voorwaarden wordt het magnetisch veld dus enkel bepaald door de stroom  $i$  en het aantal windingen per lengte-eenheid. Aan de uiteinden van de solenoïde is de magnetische veldsterkte op de as nog maar de helft van haar waarde in het midden.

### Exemple 3

Un solénoïde de 50 cm de longueur et de 5 cm de diamètre comporte 500 spires et est parcouru par un courant de 1 A. Calculer

1° le champ magnétique au centre du solénoïde.

2° le flux de ce champ à travers la section du solénoïde.

### Solution

1° L'application de la relation (5) donne:

$$B = \mu_0 n i = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{500}{0,5} \cdot 1 = 12,6 \cdot 10^{-4} \text{ tesla}$$

2° Comme le champ magnétique est pratiquement uniforme au centre du solénoïde, le flux de ce champ vaut, selon la relation (2):

$$\Phi = BS = B \frac{\pi D^2}{4} = 12,57 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\pi \cdot (0,05)^2}{4} = 2,47 \cdot 10^{-6} \text{ weber}$$

## 2. LA LOI DE FARADAY

### 2.1 Les expériences de Faraday

Dans une première expérience, Faraday constate l'influence du champ magnétique d'un aimant permanent naturel sur un circuit électrique (figure 7). Le circuit électrique est composé d'une bobine branchée aux bornes d'un galvanomètre G permettant de mesurer le sens du courant.



Michael FARADAY (1791–1867). Physicien et chimiste britannique. (source: Wikipedia)

Michael FARADAY (1791–1867). Brits fysicus en chemicus (bron: Wikipedia)

Fig. 7. Première expérience de Faraday. Un barreau aimanté est déplacé par rapport à un circuit constitué d'une bobine branchée aux bornes d'un galvanomètre G. Selon l'orientation de l'aimant et le sens de son déplacement, le galvanomètre dévie dans un sens ou dans l'autre.

Fig. 7. Eerste proef van Faraday. Een magneetstaaf wordt verplaatst ten opzichte van een schakeling die bestaat uit een spoel, verbonden met de klemmen van een galvanometer G. De galvanometer wijkt uit in de ene of de andere zin, volgens de polarisatie van de magneetstaaf en de zin van zijn verplaatsing.

Lorsque le pôle nord de l'aimant est déplacé vers la bobine, l'aiguille du galvanomètre dévie, indiquant qu'un courant circule dans le circuit (situation no 1). Si le pôle nord de l'aimant est éloigné de la bobine (situation no 2), l'aiguille du galvanomètre dévie dans l'autre sens, indiquant un courant circulant dans le sens contraire au précédent. Si les pôles nord et sud de l'aimant sont permutés, on observe les mêmes phénomènes que ci-dessus, mais en sens inverse (situations no 3 et 4). **Il faut bien noter que le courant apparaît uniquement lors du déplacement de l'aimant.**

Au lieu de déplacer l'aimant, on peut aussi déplacer la bobine par rapport à l'aimant immobile. On obtient alors les mêmes résultats, ce qui indique que c'est uniquement le mouvement relatif de l'aimant par rapport à la bobine qui compte. Le courant apparaissant dans le circuit est appelé **courant induit**; on dit qu'il est produit par une **force électromotrice induite**.

Dans une autre expérience, illustrée à la figure 8, une bobine B2 branchée aux bornes d'un galvanomètre G, est placée dans le voisinage d'une bobine B1 pouvant être branchée sur une source de tension par l'intermédiaire d'un interrupteur S. Lorsque l'on ferme l'interrupteur S,

Fig. 8. Deuxième expérience de Faraday. Une bobine B<sub>1</sub> branchée sur une source de tension U par l'intermédiaire d'un interrupteur S est couplée magnétiquement à une bobine B<sub>2</sub> branchée aux bornes d'un galvanomètre G. Lorsque l'on ferme ou lorsque l'on ouvre S, le galvanomètre accuse une brève déviation.

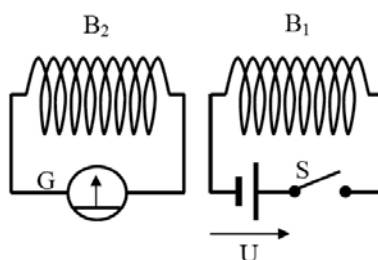


Fig. 8. Tweede proef van Faraday. Een spoel B<sub>1</sub>, verbonden op een spanningsbron U via een schakelaar S, is magnetisch gekoppeld met een spoel B<sub>2</sub>, verbonden met de klemmen van een galvanometer G. De galvanometer vertoont een kortstondige uitwijking als men S sluit of opent.

### Voorbeeld 3

Een solenoïde met lengte 50 cm en diameter 5 cm bevat 500 windingen en wordt door een stroom van 1 A doorlopen. Bereken:

1° het magnetisch veld in het midden van de solenoïde

2° de flux van dit magnetisch veld in een doorsnede van de solenoïde

### Oplossing

1° Uitwerking van de formule (5) geeft:

$$B = \mu_0 n i = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{500}{0,5} \cdot 1 = 12,6 \cdot 10^{-4} \text{ tesla}$$

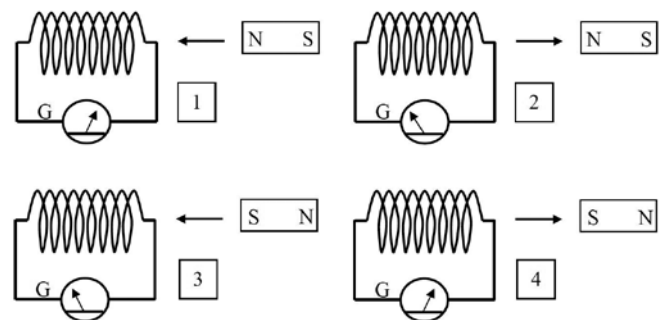
2° Vermits het magnetisch veld quasi eenvormig is in het midden van de solenoïde, wordt de magnetisch flux ervan berekend volgens de formule (2):

$$\Phi = BS = B \frac{\pi D^2}{4} = 12,57 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\pi \cdot (0,05)^2}{4} = 2,47 \cdot 10^{-6} \text{ weber}$$

## 2. DE WET VAN FARADAY

### 2.1 De proeven van Faraday

In een eerste proef stelt Faraday de invloed vast van het magnetisch veld van een permanente natuurlijke magneet op een elektrische schakeling (figuur 7). De schakeling besaait uit een spoel aangesloten op de klemmen van een galvanometer G waarmee de stroomzin kan gemeten worden.



Als de noordelijke pool van de magneet naar de spoel wordt bewogen, wijkt de naald van de galvanometer uit, hetgeen aanduidt dat er een stroom door de schakeling vloeit (geval 1). Als de noordelijke pool van de magneet wordt verwijderd (geval 2), wijkt de naald uit in de ander zin, hetgeen wil zeggen dat er een stroom vloeit in tegengestelde zin als in geval 1. Als de noordelijke pool wordt vervangen door de zuidelijke pool worden dezelfde verschijnselen waargenomen, maar in omgekeerde zin (gevallen 3 en 4). **Let wel: er vloeit enkel een stroom tijdens de verplaatsing van de magneet.**

Men kan ook de spoel verplaatsen ten opzichte van een onbeweeglijke magneet. Men bekomt dan dezelfde resultaten. Het is dus enkel de relatieve beweging van de magneet ten opzichte van de spoel die een rol speelt. De stroom in de schakeling wordt 'geïnduceerde stroom' genoemd; hij wordt veroorzaakt door wat men een **geïnduceerde elektromotorische kracht** noemt.

In een andere proef, geïllustreerd in de figuur 8, wordt een spoel B2, verbonden met de klemmen van een galvanometer G, in de omgeving van een spoel B1 geplaatst die via een schakelaar S kan verbonden worden met een spanningsbron. Als de schakelaar S wordt gesloten, vloeit

un courant circule dans B1 et on constate que le galvanomètre accuse une brève déviation, indiquant le passage d'un bref courant induit dans B<sub>2</sub>. Lorsque l'on ouvre l'interrupteur S, un courant induit apparaît à nouveau, mais cette fois de sens contraire au premier. Dans cette expérience, contrairement à l'expérience précédente, il n'y a pas de déplacement d'un objet par rapport à un autre.

## 2.2. La loi de Faraday

De ces deux expériences, Faraday déduisit que ce qui provoquait l'apparition d'un courant induit, c'était la variation de flux magnétique à travers la bobine branchée aux bornes du galvanomètre. Nous avons vu plus haut (**relation 2**) que le flux d'un champ magnétique  $\vec{B}$  uniforme à travers une surface S perpendiculaire à la direction du champ, est égal au produit de l'intensité B du champ par la surface S. On peut donc faire varier le flux en faisant varier B ou S. Dans la première expérience de Faraday, le champ  $\vec{B}$  de l'aimant est constant et on fait varier le flux en déplaçant l'aimant par rapport à la bobine. Dans la deuxième expérience de Faraday, c'est le courant apparaissant ou disparaissant dans la bobine B1 qui donne lieu à un champ magnétique variable en intensité et par conséquent à une variation de flux à travers B<sub>2</sub>.

Ces considérations physiques sont traduites mathématiquement dans la loi de Faraday:

$$u = - \frac{d\phi}{dt} \quad (6)$$

ans la relation (6), u est la force électromotrice induite dans le circuit soumis à une variation de flux; l'expression  $\frac{d\phi}{dt}$  est le symbole mathématique de l'opération de dérivation et représente la vitesse de variation du flux dans le temps (en weber par seconde). La loi de Faraday dit donc que la force électromotrice induite u est égale en valeur absolue à la vitesse de variation du flux. Le signe – dans la relation (6) est dû au fait que le courant induit à un sens tel qu'il tend à s'opposer à la variation de flux qui l'a produit (voir la loi de Lenz dans la deuxième partie de cet article).

### Remarque 3

La relation (6) est une relation générale. Dans le cas particulier d'une bobine de N spires, telle que la bobine B<sub>2</sub> de la figure 8 par exemple, la force électromotrice totale induite dans le circuit est la somme de toutes les fem induites dans chacune des N spires. Si le champ magnétique est uniforme à l'intérieur de B<sub>2</sub>, on aura:

$$u = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (7)$$

Voir l'exemple 4 dans la 2<sup>ème</sup> partie.

Dans la 2<sup>ème</sup> partie de cet article, nous parlerons de la loi de Lenz ainsi que des phénomènes d'induction mutuelle et d'auto-induction. La bibliographie sera donnée à la fin de cette 2<sup>ème</sup> partie.

ON5WF (on5wf@uba.be)

een stroom door B1 en stelt men vast dat de galvanometer kortstondig uitwijkt, hetgeen wijst op een kortstondige geïnduceerde stroom B<sub>2</sub>. Opent men de schakelaar S, dan manifesteert de geïnduceerde stroom zich opnieuw, maar deze keer in tegengestelde zin. In deze proef is er, in tegenstelling tot de voorgaande, geen sprake van relatieve verplaatsing van voorwerpen.

## 2.2. De wet van Faraday

Uit deze twee proeven leidde Faraday af dat het de verandering van de magnetische flux door de met de galvanometer verbonden spoel is die maakt dat er een stroom optreedt. Hiervoor (**formule 2**) hebben we gezien dat de uniforme flux van een magnetisch veld  $\vec{B}$  door een vlak S loodrecht op de veldrichting, gelijk is aan het product van de veldsterkte en het vlak S. Men kan dus de flux doen veranderen door B of S te veranderen. In de eerste proef van Faraday is het veld  $\vec{B}$  van de magneet constant en wordt de flux gewijzigd door de magneet te verplaatsen ten opzichte van de spoel. In de tweede proef van Faraday leid het optreden of wegvallen van een stroom in spoel B1 tot een magnetisch veld met veranderlijke veldsterkte en dus tot een fluxverandering doorheen B<sub>2</sub>.

Deze natuurkundige waarnemingen worden wiskundig vertaald als de wet van Faraday:

$$u = - \frac{d\phi}{dt} \quad (6)$$

In de formule (6) is u de elektromotorische kracht geïnduceerd in een schakeling onderworpen aan een fluxwijziging.  $\frac{d\phi}{dt}$  is het wiskundig symbool voor een afgeleide bewerking en vertegenwoordigt de snelheid van de fluxwijziging in de tijd (uitgedrukt in weber per seconde). De wet van Faraday drukt dus uit dat de geïnduceerde elektromotorische kracht u in absolute waarde gelijk is de snelheid waarmee de flux verandert. Het minteken in de formule is te wijten aan het feit dat de zin van de geïnduceerde stroom zodanig is dat de fluxvariatie die de stroom heeft veroorzaakt, wordt tegengewerkt (cfr. de wet van Lenz in het tweede gedeelte van dit artikel).

### Opmerking 3

De formule (6) is algemeen. In het specifieke geval van een spoel met N windingen, zoals de spoel B<sub>2</sub> in figuur 8 bijvoorbeeld, is de totale geïnduceerde elektromotorische kracht in de schakeling de som van alle geïnduceerde emk in elke winding van de N windingen. Als het magnetisch veld uniform is binnen B<sub>2</sub>, dan is:

$$u = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (7)$$

Zie ook het voorbeeld 4 in deel 2.

In het tweede gedeelte van het artikel zal de wet van Lenz aan bod komen, evenals de fenomenen wederzijdse inductie en zelfinductie. De bibliografie wordt op het einde van deel 2 vermeld.

ON5WF (on5wf@uba.be)