



Leçon 16

PRODUCTION DU COURANT ALTERNATIF

Activité

Le document ci-contre présente un groupe électrogène, source de courant alternatif. Dans un tel appareil, se produit le phénomène d'induction électromagnétique.

Comment expliquer ce phénomène et quel est le mode de fonctionnement d'une telle source ?



ACTIVITÉS

Objectifs

- ⇒ Interpréter le phénomène d'induction électromagnétique
- ⇒ Décrire le mode de fonctionnement d'une source de courant alternatif.

1. Rappels de magnétostatique1.1. Définition du champ magnétique

- Le **champ magnétique** est une région de l'espace dans laquelle des objets ferromagnétiques sont soumis à des forces ferromagnétiques.
- Un champ magnétique est caractérisé en chacun de ses points par une grandeur vectorielle $\vec{B}$ appelée **vecteur champ magnétique** ou **induction magnétique**.
- Caractéristiques de $\vec{B}$:
 - **Direction et sens** : axe orienté $\overrightarrow{SN}$ définit par une aiguille aimantée, le sens est celui du pôle Nord de l'aiguille.

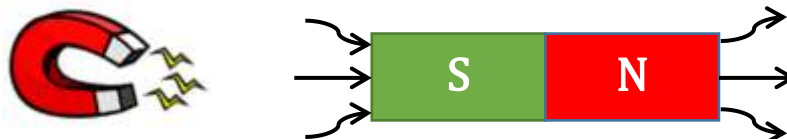


Figure 16.1 : Sens du champ magnétique

- **Intensité** : c'est une grandeur scalaire mesurable à l'aide d'un **Tesla-mètre** ou d'une **sonde de Hall**. Son unité est le **Tesla** de symbole (T).

Exemples

champ magnétique terrestre :	$2.10^{-5} \leq B \leq 7.10^{-5}$	(T)
Aimant du haut-parleur :	$10^{-3} \leq B \leq 5.10^{-1}$	(T)
Aimant ordinaire :	$2.10^{-3} \leq B \leq 5.10^{-3}$	(T)

Champ géomagnétique

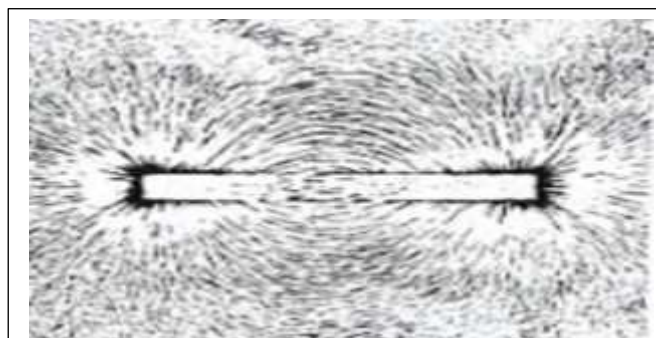
Le champ magnétique au voisinage de la Terre est appelé **champ géomagnétique** ou **champ magnétique terrestre**.

1.2. Spectre magnétique

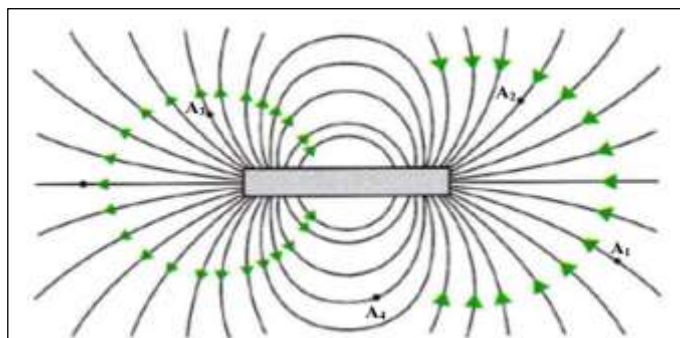
Versons de la limaille de fer sur un aimant ; on observe que les grains de limaille s'organisent selon des lignes courbes privilégiées.

- Ces lignes sont appelées **lignes de champ**.

- L'ensemble de ces lignes de champ est appelé **spectre magnétique** de l'aimant
- Une ligne de champ est une ligne courbe, tangente au vecteur $\vec{B}$ en chacun de ses points.
- **Représentation :**



(a) Spectre magnétique matérialisé par de la limaille de fer.



(b) Représentation de quelques lignes de champ

Figure 16.2 : Spectre et lignes du champ magnétique sur un barreau aimanté

Remarque

- ✍ Les lignes de champ sont des courbes qui sont tangentes en chacun de leurs points au vecteur champ magnétique.
- ✍ Lorsque les lignes de champ sont des droites parallèles, le champ magnétique est dit **uniforme** (c'est le cas par exemple à l'intérieur d'un aimant en U)
- ✍ Il n'existe pas de monopôles magnétiques car lorsqu'on brise un aimant, on obtient toujours un aimant à deux pôles.

2. Champ magnétique créé par un courant

2.1. Expérience d'Oersted : Mise en évidence

Matériels

- Une alimentation, réf. 01981
- Un rhéostat, réf. 04034
- Un ampèremètre, réf. 01266
- Un interrupteur simple sur socle, réf. 04162
- Des cordons de raccordement double puits, Ø 4 mm.

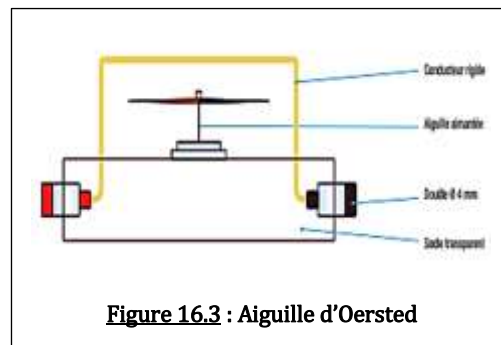


Figure 16.3 : Aiguille d'Oersted

Remarque

L'aiguille aimantée SN, orientée par la composante horizontale de l'induction magnétique terrestre, est placée parallèlement au conducteur rectiligne en cuivre.

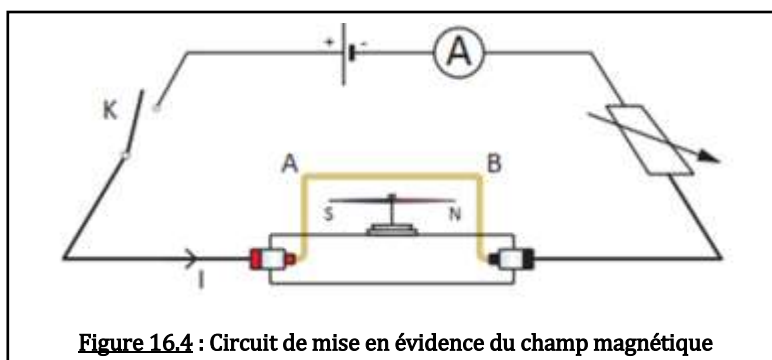


Figure 16.4 : Circuit de mise en évidence du champ magnétique

Observations

- Faisons passer un courant électrique d'intensité I dans le fil AB en fermant l'interrupteur K.
- Aussitôt, l'aiguille aimantée SN dévie. Ainsi le passage du courant dans le conducteur **génère un champ magnétique**.
- La règle d'AMPÈRE donne le sens de déviation : un observateur (bonhomme d'Ampère) est couché le long du fil AB, de façon que le courant entre par ses pieds et ressorte par sa tête. Il regarde le pôle nord de l'aiguille qu'il voit se déplacer vers sa gauche.
- Si l'on inverse le sens de passage du courant, on constate que l'aiguille aimantée se déplace vers sa droite.

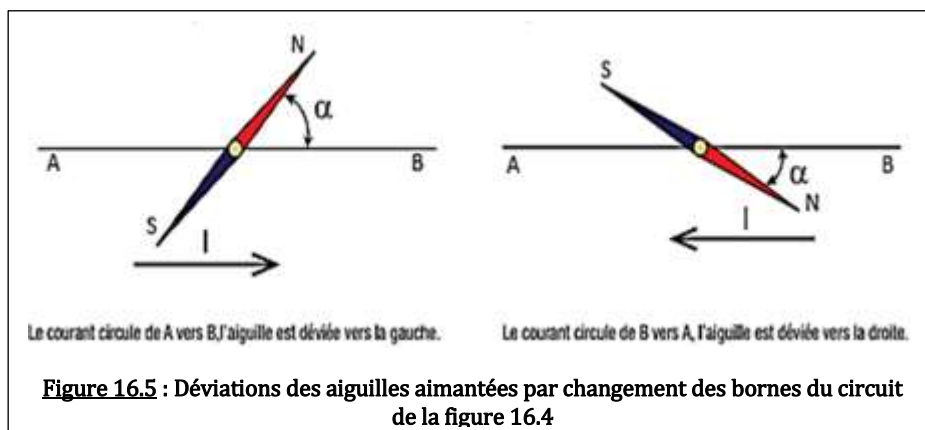


Figure 16.5 : Déviations des aiguilles aimantées par changement des bornes du circuit de la figure 16.4

2.2. Caractéristique du champ magnétique d'un courant

Comme tout segment de droite fléché (vecteur), le vecteur champ magnétique est caractérisée par :

- Une direction** : elle est toujours tangente à la ligne de champ en un point.
- Un sens** : il est donné par la règle de l'**observateur d'Ampère** :

« l'observateur d'Ampère regardant un point M, est placé sur le conducteur, de telle sorte que le courant le traverse des pieds vers la tête. Son bras gauche tendu latéralement, indique le sens de $\vec{B}$ ».

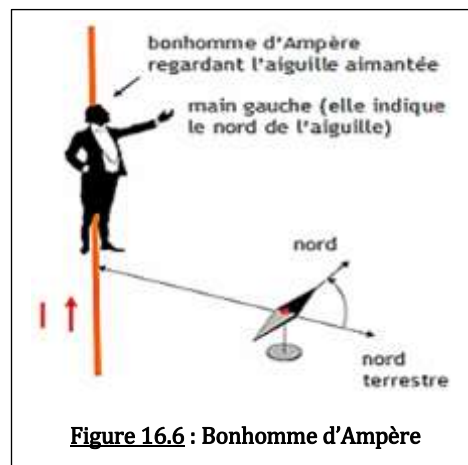


Figure 16.6 : Bonhomme d'Ampère

- Une Intensité** : elle est proportionnelle à celle de I et dépend de la position du point M et de la forme du conducteur.
- Une origine** ou point d'application, qui, pour certains, se trouve au centre de celui-ci.

Nota Bene

Tout conducteur parcouru par un courant électrique, crée à son voisinage, un champ magnétique.

2.2.1. Les conducteurs rectilignes

L'intensité du vecteur champ magnétique $\vec{B}$ créé par un courant rectiligne infiniment long d'intensité I en un point M distant de d du conducteur a pour expression :

$$B = 2 \times 10^{-7} \times \frac{I}{d} \quad (16.1)$$

Unités : I (en A) ; d (en m) B (en T).

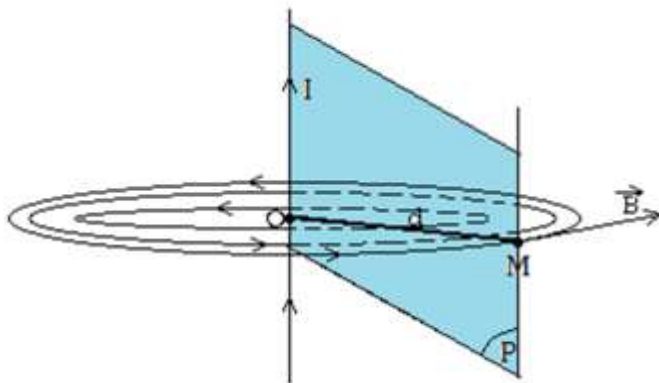


Figure 16.7 : Champ magnétique créé en un point M par un conducteur rectiligne infiniment long.

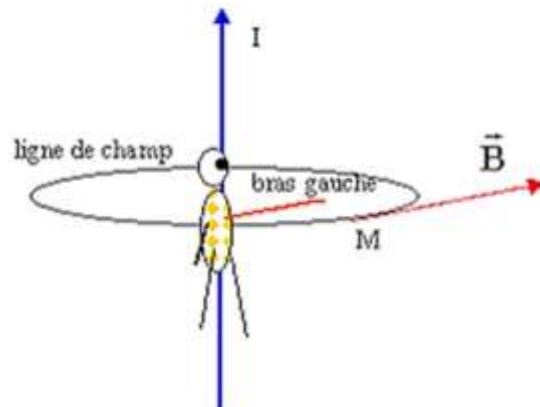
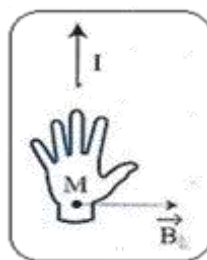


Figure 16.8 : Sens et direction donnés par le bonhomme d'Ampère.

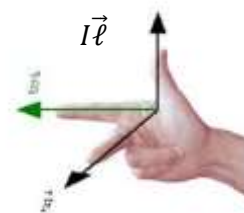
Remarque

Le sens du vecteur champ magnétique peut aussi être donné par la règle de la main droite :

« Le sens du vecteur CM est celui du pouce d'une main droite ouverte, la paume tournée vers M et le courant sortant des doigts ».



Main droite



3-doigts de la main droite

Nota Bene

Si le champ magnétique est créé par un « paquet » de n-conducteurs parcourus par des courants de même intensité I et circulant dans le même sens, on a :

$$B = 2 \times 10^{-7} \times n \times \frac{I}{d} \quad (16.2)$$

2.2.2. Bobine plate ou conducteur circulaire à N-spires de rayon R

Vers le centre de la spire ou de la bobine plate, les lignes de champ sont sensiblement des droites. Le vecteur CM $\vec{B}_0$ est orthogonal au plan des spires. Le sens de $\vec{B}_0$ est donné par la règle de l'observateur d'Ampère.

Intensité : $B_0 = 2\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{N \times I}{R} \quad (16.3)$

Unités : I (A) ; R (m)=rayon de spire ; B_0 (T)

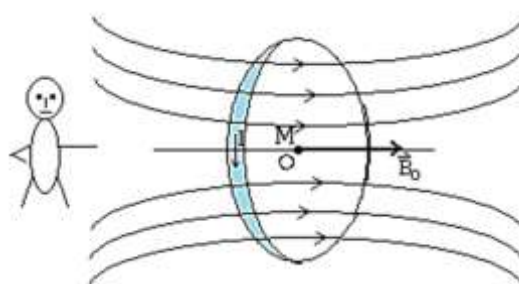


Figure 16.9 : Champ magnétique créé au centre d'une pire ou d'une bobine plate

Remarque

L'épaisseur (e) de la bobine est négligeable devant le rayon d'une spire.

2.2.3. Solénoïde de longueur L à N-spires

- À l'intérieur du solénoïde (figure 16.10), les lignes de champ sont sensiblement des droites parallèles (**champ quasi-uniforme**).
- Le **sens** de $\vec{B}_0$ en O, centre du solénoïde, est donné soit par l'observateur d'Ampère, soit par la règle du tire-bouchon de Maxwell: « placé dans l'axe du solénoïde, et tournant dans le sens de I, le tire-bouchon avance dans le sens de $\vec{B}_0$ », soit par la règle de la main droite.

• Intensité :

$$B_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \times \frac{N \times I}{L} = \mu_0 \times \frac{N \times I}{L} \quad (16.4)$$

Remarque

✍ Si on pose $n = \frac{N}{L}$ = nombre de spires par unité de longueur (16.5)

, (16.5) devient $B_0 = \mu_0 \times n \times I$. (16.6)

Où $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ est appelé **perméabilité magnétique dans le vide et dans l'air**.

✍ Si les spires sont jointives, $L = N \times d$ (16.7)
où d est le diamètre du fil conducteur, L la longueur du solénoïde et N le nombre de spires.

✍ Dans le cas où l'épaisseur e de l'isolant n'est pas négligée, $L = N(d + 2e)$ (16.8)

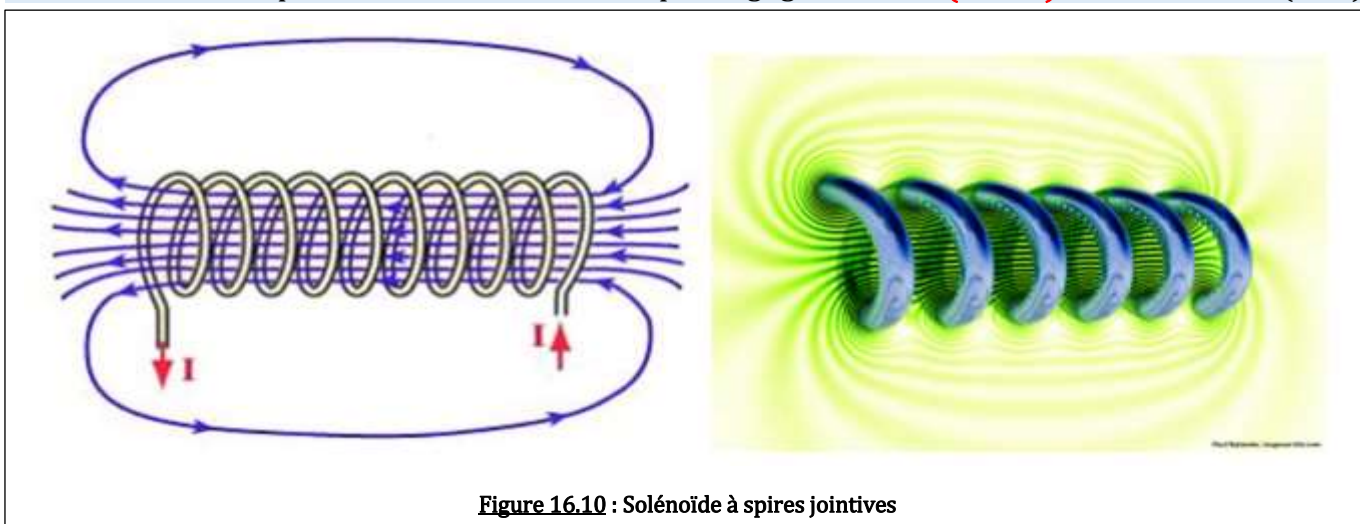


Figure 16.10 : Solénoïde à spires jointives

Exemple

On enroule sur un cylindre de longueur grande devant son diamètre, un fil conducteur isolé de diamètre $D = 1,2$ mm. L'enroulement est à spires jointives, sur une seule couche, toujours dans le même sens. Calculer l'intensité du champ magnétique créé à l'intérieur du cylindre lorsque le fil est parcouru par un courant électrique d'intensité $I = 8$ A.

Solution

Données : $D = 1,2$ mm ; $I = 8$ A.

L'intensité B du champ magnétique a pour expression : $B = \mu_0 \times n \times I$, où n est le nombre de spires par unité de longueur.

- Déterminons n .

Les spires étant jointives et en une seule couche, il y a, par unité de longueur, autant de spires qu'il y a de diamètres du fil qui constitue la bobine.

$$\text{On a alors : } n = \frac{1}{D}$$

$$\text{- Ainsi, } B = 4\pi \cdot 10^{-7} \times n \times I = 4\pi \cdot 10^{-7} \times \frac{I}{D} \quad \text{AN : } B = 8,37 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

3. Flux magnétique à travers une surface

- Plongeons une bobine dans le champ magnétique d'un aimant droit. En déplaçant l'aimant par rapport à la bobine, on constate que le nombre de lignes de champ à travers la surface de la bobine est plus grand lorsque l'aimant est plus proche de la bobine.

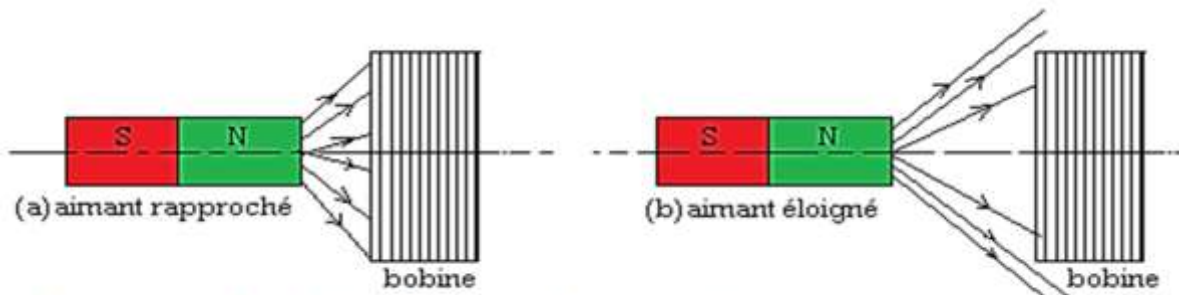


Figure 16.11 : Bobine baignant dans un champ créé par un aimant

- La grandeur physique qui caractérise le nombre de lignes de champ à travers la surface de la bobine est appelée **flux magnétique** et est noté Φ (phi).
- Notons S la surface plongeant dans un champ magnétique $\vec{B}$.

- Le vecteur $\vec{n}$ est la normale à la surface (S).
- Le **flux magnétique** Φ de $\vec{B}$ à travers (S) est tel que :

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{n} S = B \times S \times \cos(\widehat{\vec{B}, \vec{n}}) \quad (16.9)$$

$$\Rightarrow \Phi = B \times S \times \cos\theta \quad (16.10)$$

Unités : S en m^2 , B en T et Φ en **weber** (Wb)

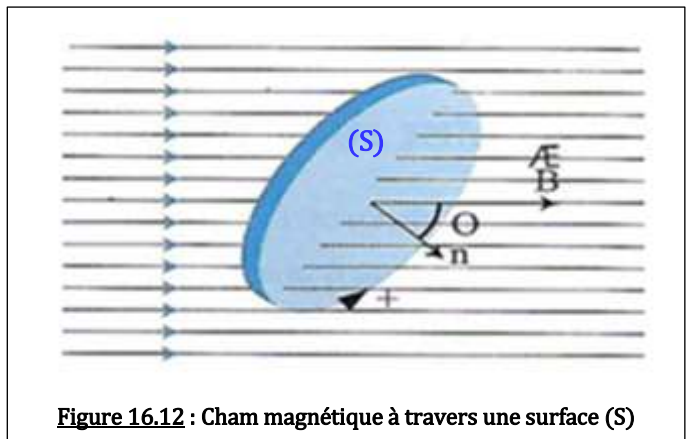
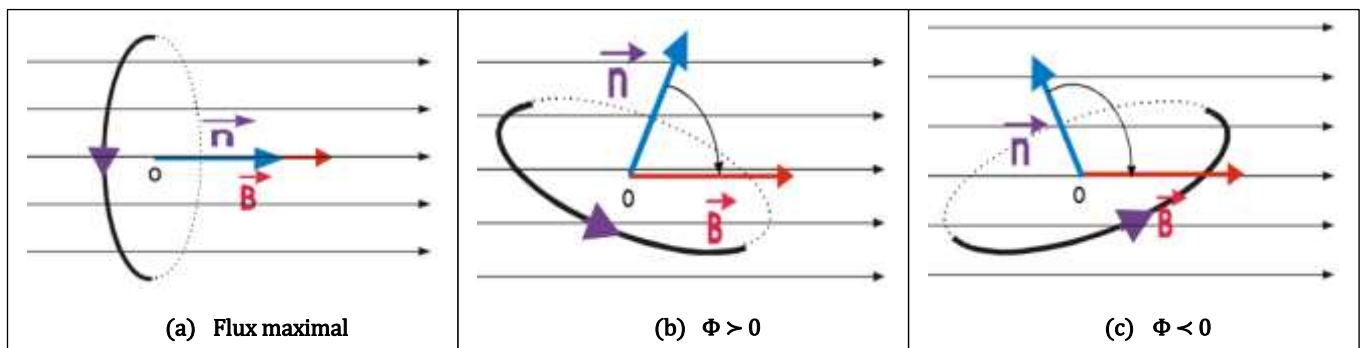
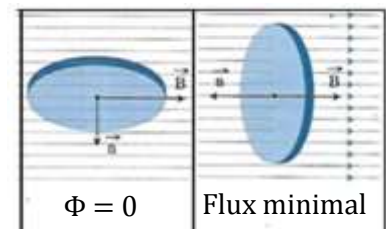


Figure 16.12 : Champ magnétique à travers une surface (S)

Conséquences liées au produit scalaire (16.9)

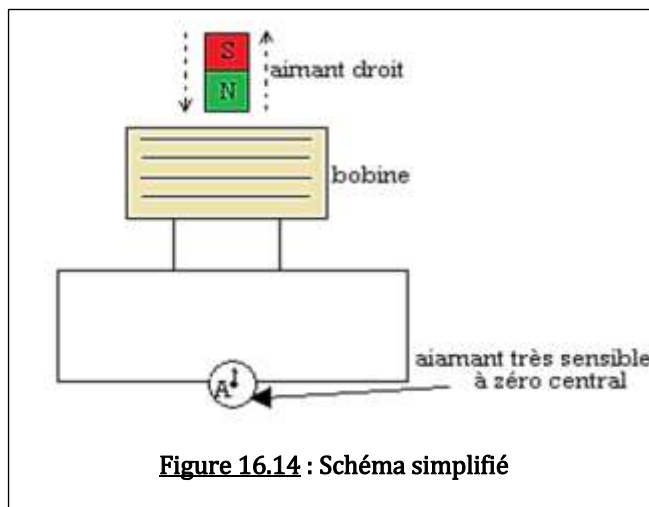
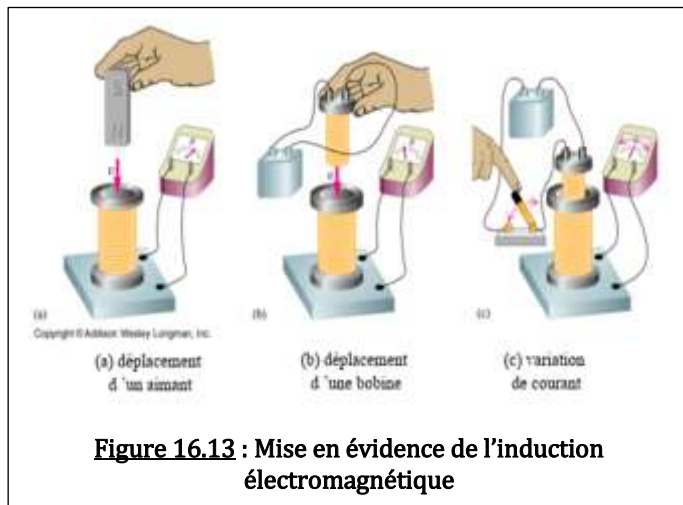
- Si $\theta = 0$, $\Phi = B \times S \rightarrow$ flux maximal et les vecteurs $\vec{n}$ et $\vec{B}$ sont colinéaires et de même sens.
- Si $\theta = \pi$, $\Phi = -B \times S \rightarrow$ flux minimal et les vecteurs $\vec{n}$ et $\vec{B}$ sont colinéaires mais de sens contraires.
- Si $\theta = \pi/2$, $\Phi = 0 \Rightarrow$ flux nul.
- Si $0 < \theta < \pi/2$, $\Rightarrow \Phi > 0$, (angle aiguë)
- Si $\pi/2 < \theta < \pi$, $\Rightarrow \Phi < 0$, (angle obtus)



4. Induction électromagnétique

4.1. Expérience de mise en évidence

Dispositif expérimental



Observations

- On approche le pôle nord de l'aimant vers la bobine, l'ampèremètre dévie. Dès qu'on éloigne ce pôle de la bobine, l'ampèremètre dévie en sens inverse.
- Si on permute les pôles de l'aimant, les sens de déviation changent aussi.
- Si le déplacement est rapide, la déviation de l'ampèremètre est importante.
- Si l'on cesse le mouvement de l'aimant, la déviation de l'aiguille cesse aussi.

Interprétation

- On approche **N** de l'aimant, le flux est grand à travers la surface de la bobine.
- On éloigne **N**, le flux diminue.
- Cette variation du flux créée par le déplacement de l'aimant impose une tension électrique aux bornes de la bobine qui se comporte à son tour comme un **générateur** de f.é.m. appelée **force électromotrice induite e**. Ce phénomène physique est appelé **induction électromagnétique**.
- L'ampèremètre mesure un courant dit **induit** dû à l'existence d'une **f.é.m. induite** dans le circuit.
- L'aimant droit qui est à l'origine du phénomène est appelé **inducteur** et la bobine est qualifiée d'**induite**.

Remarque

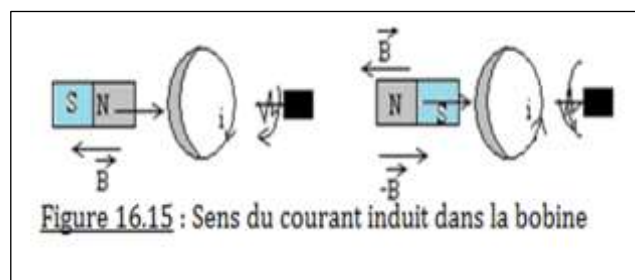
- Toute variation du flux à travers un circuit crée un **courant induit**.
- L'induction électromagnétique est la **création d'une source de tension** dans un circuit en utilisant un flux magnétique variable.

4.2. Sens du courant induit

Loi de Lenz

« Le sens du courant induit est tel que, par ses effets électromagnétiques, il s'oppose à la cause qui lui donne naissance ».

Le sens du courant induit dans la bobine est donné par la figure ci-contre :





4.3. La force électromotrice induite

- Si dans le circuit induit, le flux varie de Φ_1 à Φ_2 pendant une durée Δt , alors, la f.é.m. moyenne d'induction apparente dans ce circuit est :

$$e_{\text{moy}} = e_m = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (16.11)$$

- Si Φ est la relation donnant les variations du flux dans le circuit induit en fonction du temps, alors, la f.é.m. instantanée d'induction apparue dans ce circuit est l'opposée de la dérivée de Φ par rapport au temps :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (16.12)$$

Loi de Faraday

« Tout circuit électrique soumis à une variation du flux est le siège d'une f.é.m. induite e tel que :

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \gg$$

Remarque

- Le signe (-) dans les expressions (16.11) et (16.12), traduit la loi de Lenz précédente.
- L'intensité du courant induit est $i = \frac{e}{R}$ (16.13)
où R est la résistance totale du circuit induit.
- Comme R est positif, e et i ont le même signe. On peut par conséquent utiliser le signe de e pour trouver le sens du courant induit :
 - Le courant induit i circule dans le sens positif si $e > 0$
 - Le courant induit circule dans le sens négatif si $e < 0$

Exemple

Une bobine plate comprenant 150-spires est placée dans un champ magnétique uniforme dont le vecteur induction magnétique $\vec{B}$ a pour intensité 0,2 T. L'aire moyenne de chaque spire est $3,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$. On fait subir à cette bobine, une rotation au cours de laquelle l'angle θ que fait la normale au plan des spires avec $\vec{B}$ passe de 0° à 90° en 0,3 s. Calculer la f.é.m. moyenne induite au cours de cette rotation.

Solution

Données : $N = 150$ spires ; $B = 0,2 \text{ T}$; $S = 3,6 \cdot 10^{-2}$; $\Delta t = 0,3 \text{ s}$; $\theta_i = 0^\circ$; $\theta_f = 90^\circ$

Calculons e_{moy} .

Par définition, $e_{\text{moy}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Phi_i - \Phi_f}{\Delta t} = \frac{NBS(\cos\theta_i - \cos\theta_f)}{\Delta t}$ **AN : $e_{\text{moy}} = 3,6 \text{ V}$.**

5. L'auto-induction

L'**auto-induction** : découverte par **Henry**, est le phénomène d'induction électromagnétique dans lequel un circuit est à la fois inducteur et induit. Il y apparaît donc une **f.é.m. d'auto-induction** suite à une variation du **flux propre Φ_p** i.e. à travers lui-même.

5.1. Mise en évidence

Sur cette figure 16.16 ci-dessous,

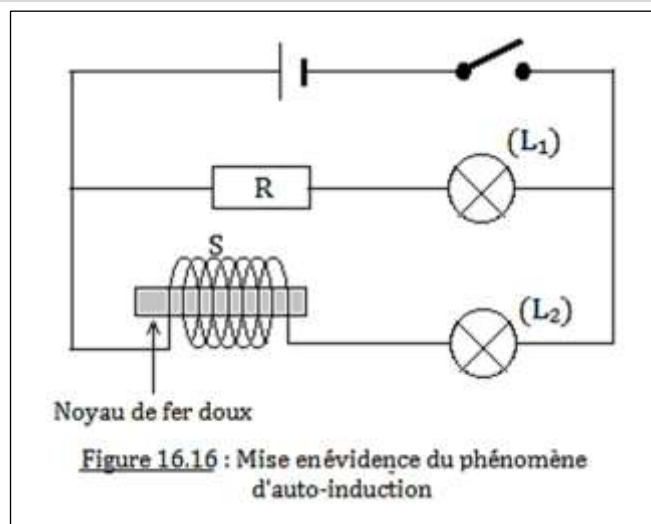
- (S) est un solénoïde avec un **noyau de fer** doux pour augmenter le flux propre.
- (R) est un conducteur ohmique de résistance R

♦ Observation :

- On ferme k : L₁ brille instantanément pendant que L₂ brille progressivement.
- On ouvre k : L₁ s'éteint instantanément pendant que L₂ s'éteint progressivement.

♦ Interprétation :

- On ferme k : la variation du flux propre dans la bobine crée une f.é.m. d'induction qui s'oppose à l'établissement du courant.
- On ouvre k : la variation du flux propre dans la bobine crée une f.é.m. d'induction qui s'oppose à la disparition du courant.



♦ Applications de l'induction :

- Elle est à l'origine de l'apparition de l'étincelle lorsqu'on débranche brutalement les appareils à moteur électrique.

- **Générateur alternatif** (Ex. : Centrale hydraulique)

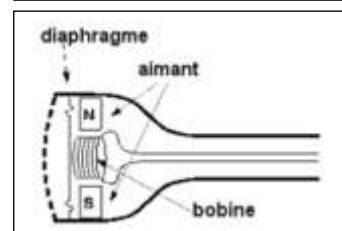
L'eau tourne une roue

- Qui tourne un électro-aimant
- Ce qui change le flux
- Et induit une f.é.m.

- **Microphone dynamique** (Ex. : Certains téléphones)

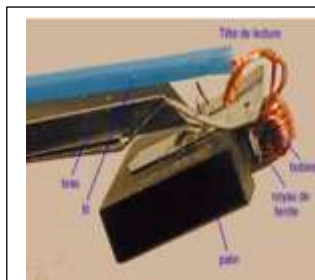
Le son

- Crée des variations de pression
- Qui font osciller le diaphragme et la bobine
- Ce qui va varier le flux
- Ce qui crée une f.é.m. variable qui suit le son.



- Lecture d'un ruban magnétique, d'un disque dur de basse densité, d'une carte de débit ou de crédit.

- L'information prend la forme d'une aimantation variable d'un matériau magnétisable qui recouvre la surface du ruban, du disque...
- De minuscules bobines réagissent aux changements de flux quand la surface défile sous elles ou quand elles se déplacent sur la surface.



5.2. Auto-inductance d'un circuit

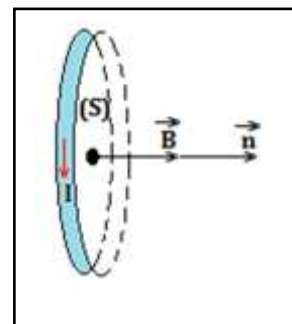
$\cos\theta = 1 \rightarrow \Phi_p = \text{flux propre de } \vec{B} \text{ à travers la surface } S.$

Posons **L**, la constante ou coefficient de proportionnalité entre Φ_p et **i**. **L** est appelé **auto-inductance** du circuit et dépend de la forme du circuit : on aura dans ce cas :

$$\Phi_p = L \times i \quad (16.14)$$

On définit l'auto-induction comme étant le phénomène d'apparition d'une f.é.m. induite dans un circuit du fait de la variation de son flux propre :

$$\Phi_p = NBS \quad (16.15)$$



Définition

L'auto-inductance ou inductance L d'un circuit, est le rapport de son flux propre Φ_P à l'intensité i du courant qui le traverse :

$$L = \frac{\Phi_P}{i} \quad (16.16)$$

Unités : i (en A) ; Φ_P (en Wb) ; L (en Henry H).

5.3. La force électromotrice d'auto-induction

La force électromotrice instantanée d'auto-induction a pour expression :

$$e = -L \frac{di}{dt}$$

(16.17)

Loi de Faraday

En cas de variation du flux magnétique à l'intérieur de ce circuit, il apparaît une tension e donnée par la relation 16.17.

5.4. Tension aux bornes d'une bobine

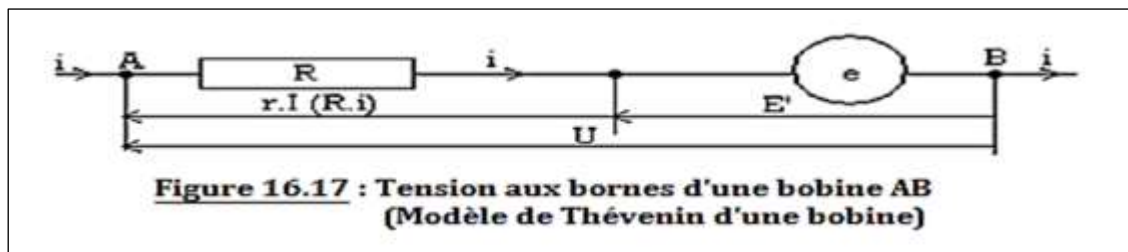


Figure 16.17 : Tension aux bornes d'une bobine AB (Modèle de Thévenin d'une bobine)

Convention récepteur : $U = E' + R \times i$ or $E' = -e = L \frac{di}{dt} \Rightarrow U = R \cdot i + L \frac{di}{dt}$ (16.18)

Remarque

- En courant continu, $i = \text{cste} \rightarrow \frac{di}{dt} = 0 \Rightarrow U = R \times i$: la bobine se comporte tel un résistor.
- En courant variable, $L = 0 \text{ H}$ et $U = R \times i$.

L'énergie emmagasinée par une bobine est donnée par : $E = \frac{1}{2} L \times i^2$ (en J) (16.19)

6. Les alternateurs (générateurs électromécaniques)

6.1. Rôle d'un alternateur

Un **alternateur** est un dispositif qui convertit le travail mécanique en énergie électrique.

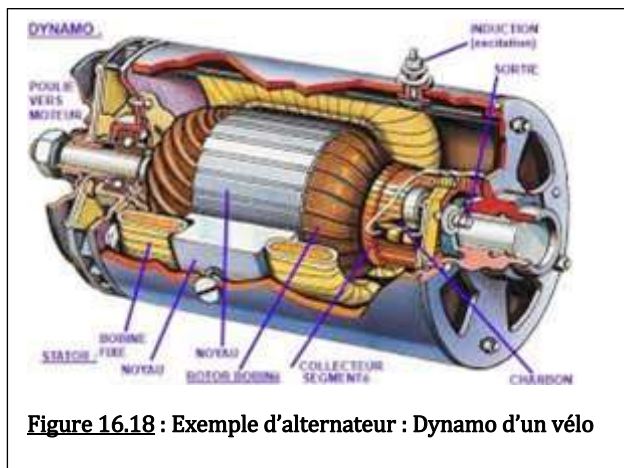


Figure 16.18 : Exemple d'alternateur : Dynamo d'un vélo

6.2. Principe de fonctionnement

- On sait que toute variation du flux à travers une surface fermée donne lieu à l'apparition d'une f.é.m. induite.
- Dans un alternateur, la variation du flux est obtenue par rotation d'un aimant au voisinage d'une bobine.
- Un alternateur est constitué de :
 - L'aimant inducteur, appelé **rotor**
 - La bobine fixe, appelée **stator**.

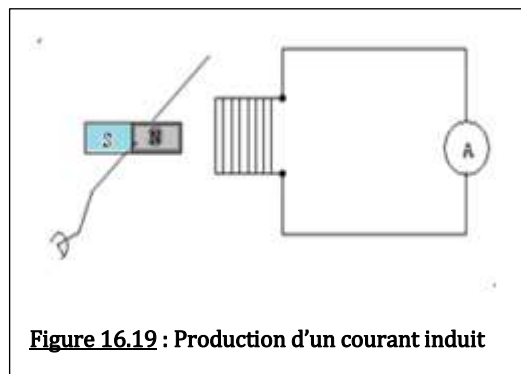


Figure 16.19 : Production d'un courant induit

Remarque

- Dans certains alternateurs, l'aimant peut être fixe et la bobine mobile.
- Dans certains alternateurs industriels, l'aimant permanent est souvent remplacé par des **électroaimants**. Ceux-ci peuvent posséder une paire de pôles (ils sont dits **dipolaires**) ou plusieurs (ils sont dits **multipolaires**).
- On distingue deux types d'alternateurs :
 - Les **alternateurs de bicyclette** (figure 16.18) ou (voir figure 14p 109 (CA))
 - Les **alternateurs industriels** (figure 16.20) ou (voir figure 15p110 (CA))

6.3. Exemples d'alternateurs

Les alternateurs de bicyclettes

La figure 16.20 ci-contre représente le schéma de principe d'un alternateur de bicyclette.

Il est constitué par une bobine fixe proche d'un aimant mobile.



Figure 16.20

Les alternateurs industriels

La figure 16.21 ci-contre représente le schéma de principe d'un exemple d'alternateur industriel.

Dans ce type d'alternateur, les aimants sont remplacés par des électroaimants. Ces derniers, solidaires du rotor, présentent des pôles Sud et Nord alternés.

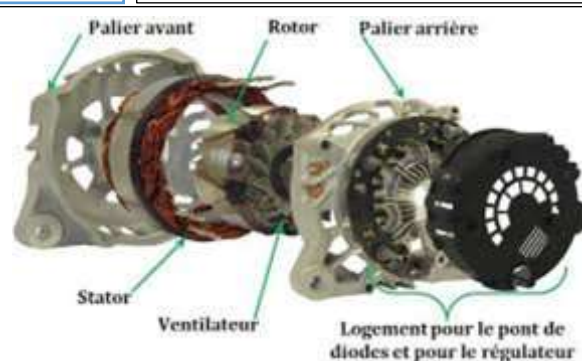
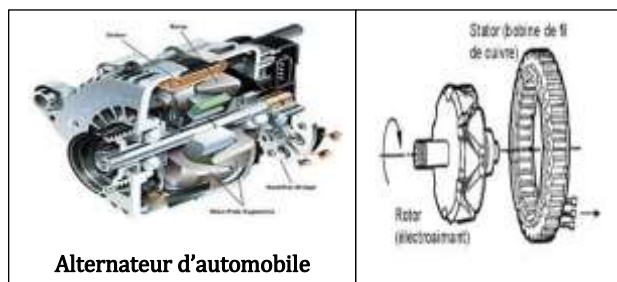


Figure 16.21

Comme autres alternateurs, on a :

- Les alternateurs d'une automobile ;
- Le groupe électrogène
- Les centrales hydroélectriques
- Les centrales solaires à turbine
- Les éoliennes
- Les centrales géothermiques, ou à biomasse.





6.4. Les sources de courant alternatif au Cameroun

On peut citer :

- Les **centrales hydroélectriques** : elles utilisent comme énergie primaire, l' E_p de l'eau.
Exemple : les centrales d'Edéa, Song Loulou, Lagdo, Lompangar, etc.
- Les **centrales thermiques** d'Oyom-Abang à Yaoundé, de Logbaba à Douala, de Bertoua. La centrale à fuel lourd de Limbé. Des groupes électrogènes.

En résumé, les principaux modes de production d'énergie électrique existants au Cameroun sont :

- Les centrales hydroélectriques
- Les centrales thermiques
- Les panneaux solaires pour installations isolées

Exemple

Une bobine de résistance $R = 10 \Omega$ a pour inductance magnétique $L = 0,5 \text{ H}$.

- Déterminer le flux magnétique de cette bobine, lorsque en un temps t quelconque, elle est parcourue par un courant d'intensité $0,87 \text{ A}$.
- Déterminer la valeur de la f.é.m. induite $\mathcal{E}_{\max}$ si le courant dans la bobine est de la forme $i(t) = 0,2 \sin(100\pi t) \text{ (A)}$.

Solution

Une bobine de résistance $R = 10 \Omega$ a pour inductance magnétique $L = 0,5 \text{ H}$. on donne : $I = 0,87 \text{ A}$.

- Déterminons le flux magnétique ϕ de cette bobine.

Par définition,

$$\phi = LI$$

$$\text{AN : } \phi = 0,435 \text{ Wb.}$$

- Déterminons la valeur de la f.é.m. induite $\mathcal{E}_{\max}$ si $i(t) = 0,2 \sin(100\pi t) \text{ (A)}$

On sait par définition que,

$$\begin{cases} \mathcal{E} = -\frac{d\phi}{dt} \\ \phi(t) = Li(t) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \mathcal{E} = \mathcal{E}_{\max} \cos(100\pi t) = -62,8 \cos(100\pi t)$$

On en déduit alors que $\mathcal{E}_{\max} = 62,8 \text{ V}$.

7. Jeu bilingue

Expression française	English expression
Auto-inductance	Self-inductance
Bobine	Bobbin, coil
Bobine d'induction	Induction coil
Alternateur	Alternator

Sentence

The induction coil is the coil that accumulates energy in electrical circuits.

- L'inducteur fait varier le flux à travers le circuit induit où apparaît une f.é.m. induite.
- On produit un courant alternatif en faisant tourner un aimant (ou une bobine parcourue par un courant continu) au voisinage d'une bobine.
- La grandeur $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ est appelée **coefficient de perméabilité magnétique dans le vide**.