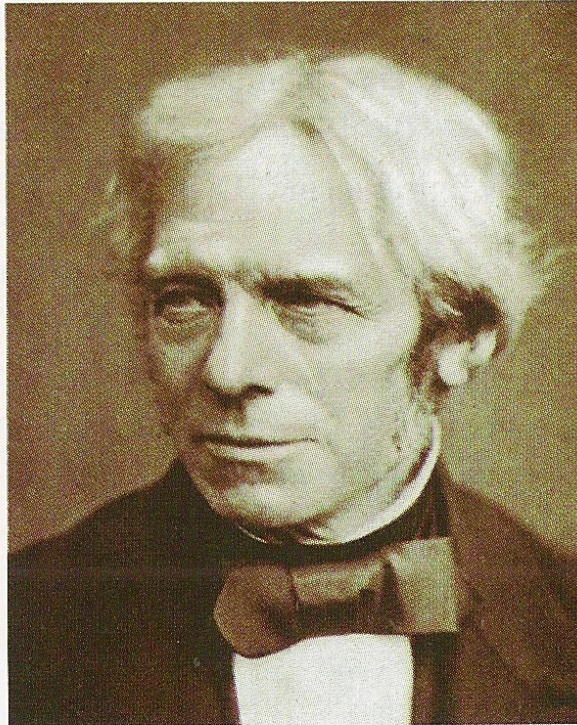


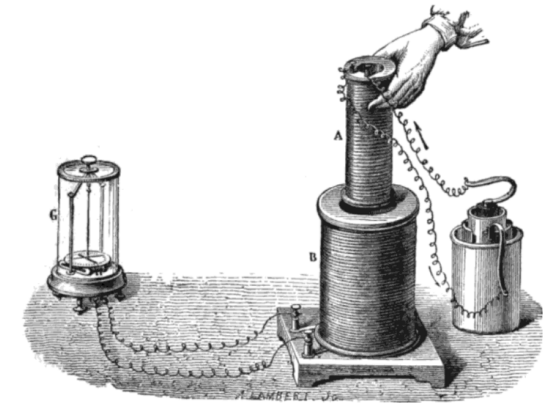
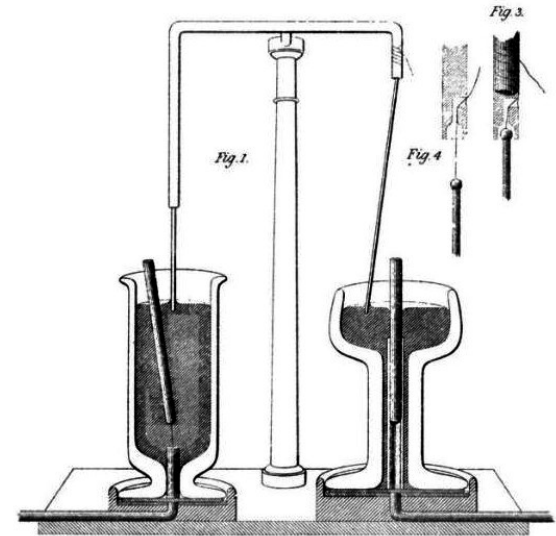
LOI DE L'INDUCTION DE FARADAY



Cette éolienne de la Gaspésie produit une f.é.m. grâce au phénomène de l'induction électromagnétique. La boîte qu'on distingue derrière l'hélice est un alternateur qui mesure plusieurs mètres de long : il contient de grandes bobines de fil qui tournent dans le champ magnétique d'un aimant. Dans ce chapitre, nous verrons pourquoi, dans une telle situation, un courant se met à circuler par induction dans les bobines.



Michael Faraday (1791-1867) était l'un des 10 enfants d'un forgeron londonien. Dans sa jeunesse, après des études sommaires, il devint apprenti relieur. Mais il décida d'entrer « au service de la science » et il devint l'un des plus grands expérimentateurs de tous les temps.



1-Flux d'un champ de vecteur

Le **flux d'un champ de vecteur** est une grandeur qui se rencontre souvent en sciences (dynamique des fluides, électromagnétisme). En ce qui vous concerne, vous allez rencontrer:

- ✓ Le flux du champ électrique dans l'équation de Maxwell-Gauss en PT.
- ✓ Le flux du champ magnétique dans la loi de Faraday en PTSI puis dans l'équation de Maxwell-Faraday en PT.

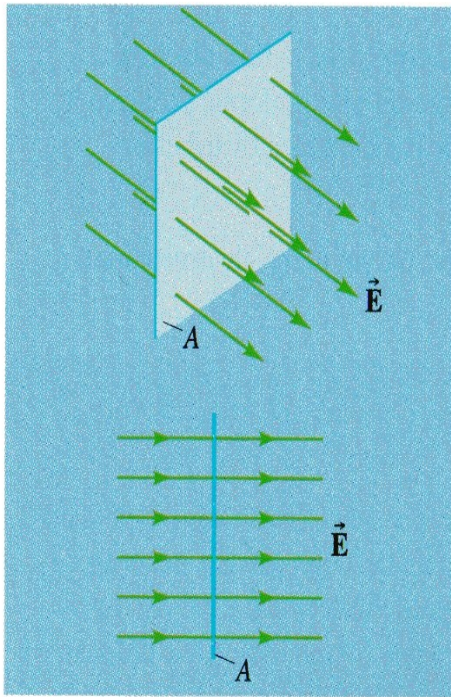


Figure 3.2 ▲

Le flux électrique à travers une surface plane d'aire A est $\Phi_E = EA$.

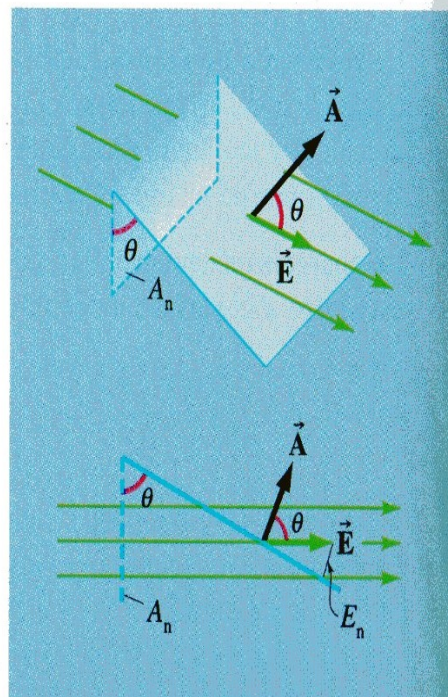


Figure 3.3 ▲

Si la surface est inclinée par rapport au champ, le flux électrique est $\Phi_E = EA \cos \theta$.

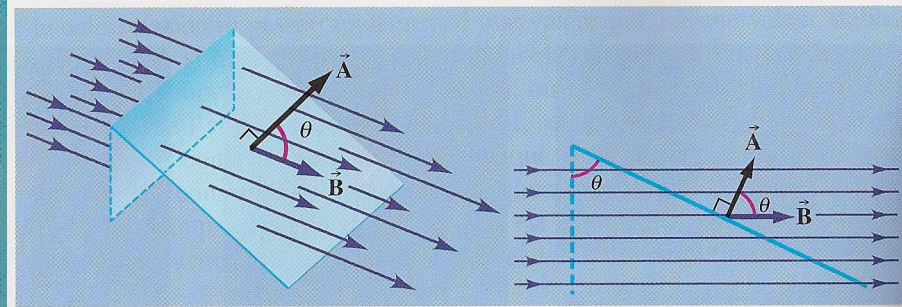


Figure 10.8 ►

Le flux magnétique à travers une surface plane dans un champ uniforme dépend de la projection de l'aire perpendiculaire aux lignes de champ.

1-Flux d'un champ de vecteur

On peut faire une analogie entre les lignes de champ électrostatique qui traversent une surface et les lignes de courant d'un fluide qui s'écoulent à travers surface. Partant de cette analogie, Gauss (nous allons en reparler) a défini la grandeur appelée **flux du champ électrostatique**. La figure ci-dessous représente une surface plane d'aire A , perpendiculaire aux lignes de champ électrostatique uniforme. Par définition, le flux du champ électrostatique Φ_E qui « traverse » cette surface est :

$$\Phi_E = E A$$

Φ_E s'exprime en $\text{N.m}^2.\text{C}^{-1}$ ou V.m .

Si la surface est inclinée et fait un certain angle avec le champ (figure 3.3 ci-dessous), le nombre de lignes interceptées dépend de A_n , la projection de la surface sur un plan normal aux lignes. Il est équivalent de dire que le flux dépend de la composante de $\vec{E}$ normale à la surface E_n , c'est-à-dire :

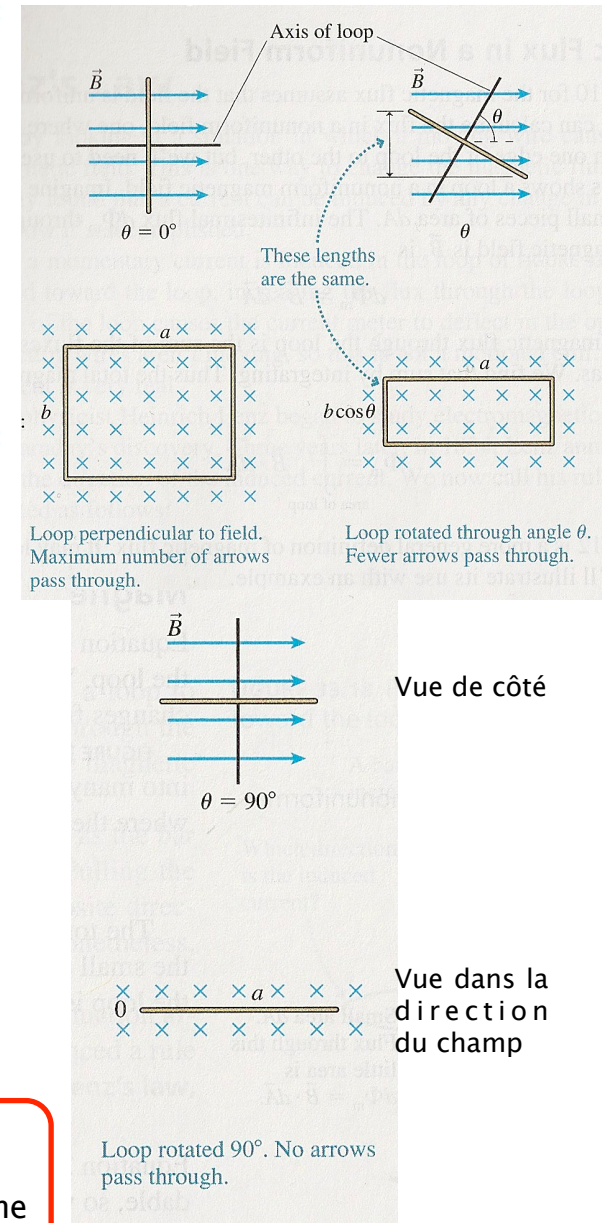
$$\Phi_E = E_n A = E A_n$$

L'orientation de la surface peut-être définie par un vecteur surface $\vec{A}$, de module égale à A et de direction perpendiculaire au plan de la surface. La notation $\vec{A}$ est plutôt la notation anglo-saxonne (A pour area), vous trouverez la notation $\vec{S}$ (S pour surface) dans les ouvrages francophones. Vous être libre de choisir la notation que vous voulez, il suffit de savoir de quoi on parle. L'orientation de $\vec{A}$ reste cependant ambiguë, on peut la prendre pour l'instant tel que Φ_E soit positif. Les deux expressions précédentes sont équivalentes à :

$$\Phi_E = E A \cos \theta$$

θ étant l'angle entre $\vec{A}$ et $\vec{E}$. On reconnaît l'expression du produit scalaire et on peut dire que le flux associé à un champ électrostatique uniforme s'écrit :

$$\begin{aligned} \Phi_E &= \vec{E} \cdot \vec{A} && \text{Flux pour un champ électrique uniforme à travers une surface plane} \\ \Phi_B &= \vec{B} \cdot \vec{A} && \text{Flux pour un champ magnétique uniforme à travers une surface plane} \end{aligned}$$



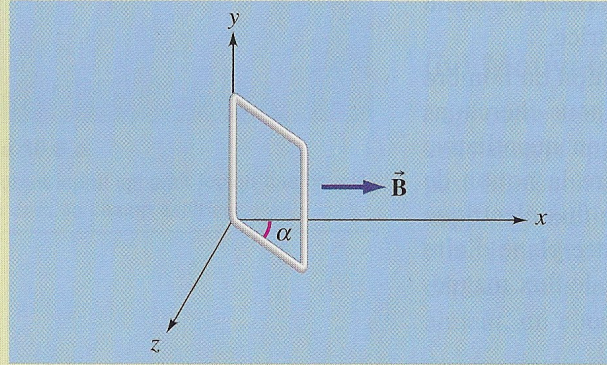
1-Flux d'un champ de vecteur

Exercice d'application 1

Un cadre carré dont chaque côté mesure 20 cm pivote autour de l'axe des y . Il est orienté comme le montre la figure 10.9a. Le champ extérieur est $\vec{B}$

$= 0,5\vec{i}$ T. Quelle est la variation du flux magnétique si l'angle α passe de 20° à 50° ?

(a)



(b)

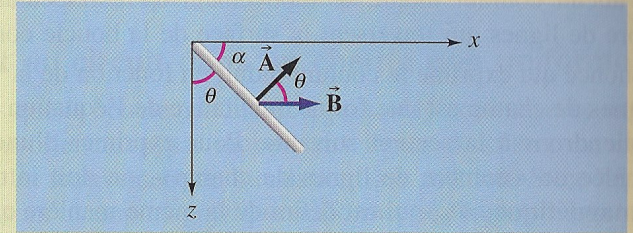


Figure 10.9 ▲

Le flux à travers le cadre change lorsque l'orientation du cadre change.

2-L'induction électromagnétique: mise en évidence expérimentale

L'induction électromagnétique permet de faire circuler un courant électrique dans un circuit fermé en l'absence de pile, ce qui implique la production d'une tension que l'on appelle (improprement) **force électromotrice (f.e.m) induite**. Pour ce faire, il est essentiel qu'il y ait présence d'un champ magnétique, mais cela ne suffit pas en soi. En effet l'induction ne se produit que dans deux circonstances précises:

- ✓ **Le champ magnétique varie dans le temps** et le circuit est immobile.
- ✓ Le champ magnétique est constant dans le temps mais **le circuit ou une de ses parties se déplace dans l'espace** tout en étant plongé dans le champ magnétique.

a) Circuit immobile, champ magnétique variable dans le temps

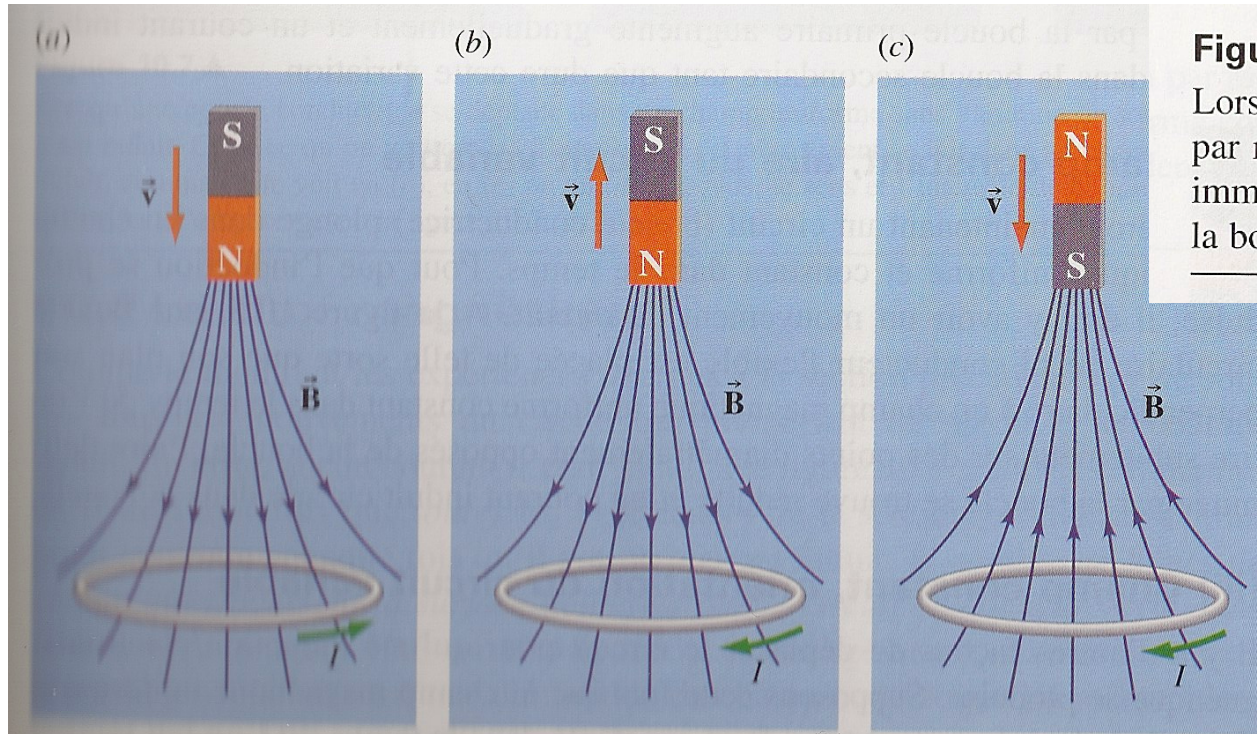


Figure 10.3 ◀

Lorsqu'un barreau aimanté se déplace par rapport à une boucle de fil conducteur immobile, un courant induit circule dans la boucle.

2-L'induction électromagnétique: mise en évidence expérimentale

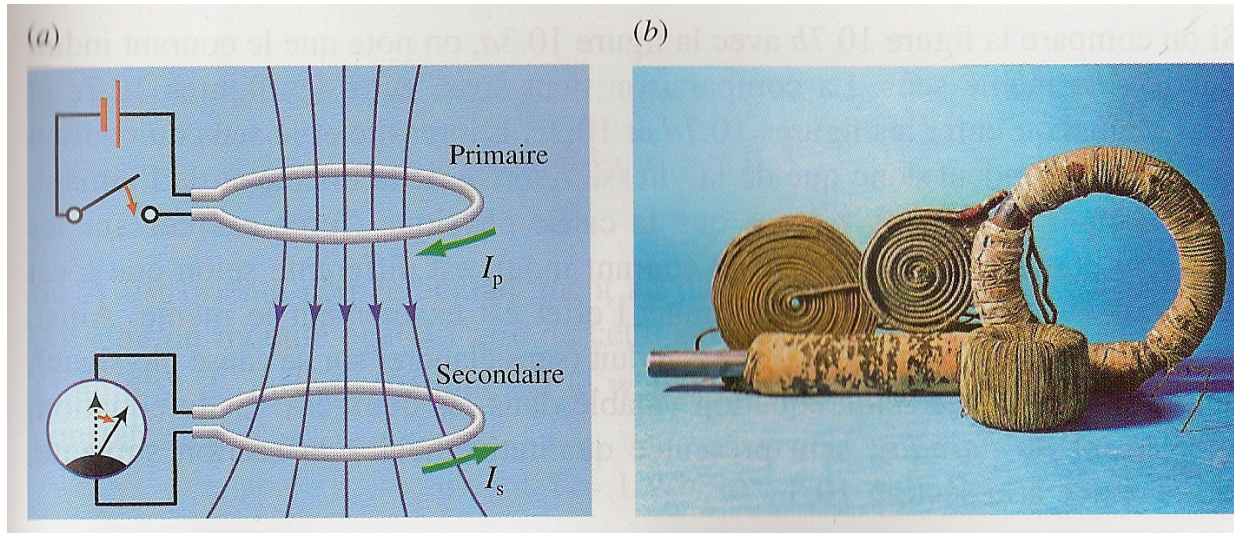


Figure 10.4 ◀

(a) Si le courant dans la boucle primaire varie, un courant induit apparaît dans la boucle secondaire. (b) Pour améliorer le couplage magnétique entre les circuits, Faraday bobina les enroulements primaire et secondaire sur un anneau circulaire en fer.

b) Champ constant, aire du circuit variable

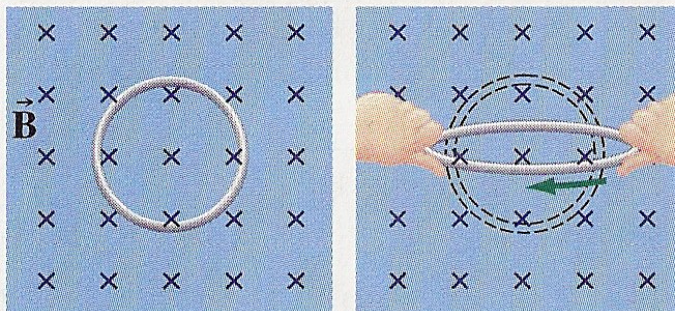


Figure 10.5 ▲

Le plan de la boucle est perpendiculaire aux lignes du champ. On observe un courant induit lorsque l'aire de la boucle varie.

c) Champ constant, orientation du circuit variable

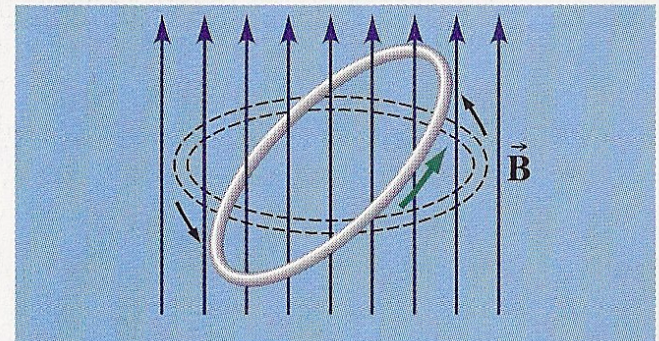


Figure 10.6 ▲

Un courant induit apparaît lorsqu'une boucle tourne dans un champ extérieur.

2-L'induction électromagnétique: mise en évidence expérimentale

d) Mouvement du circuit dans un champ non uniforme

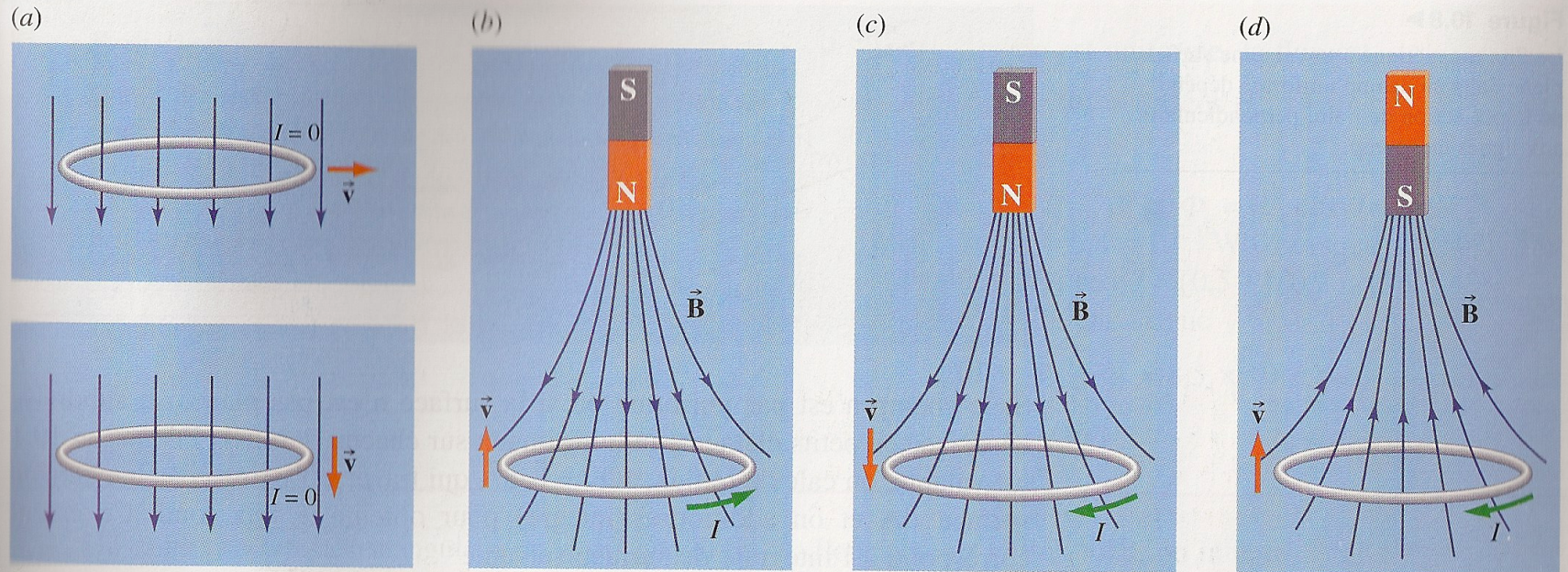


Figure 10.7 ▲

Lorsqu'une boucle conductrice se déplace dans un champ uniforme sans variation de son orientation par rapport à celle du champ, aucun courant n'est induit. C'est ce qu'on voit en (a). Toutefois, si ce mouvement se fait dans un champ non uniforme comme celui d'un aimant, un courant est induit, comme on le voit en (b), en (c) ou en (d). De plus, le sens et l'intensité du courant ne dépendent que de la vitesse *relative* de l'aimant et de la boucle. (Comparez avec la figure 10.3, p. 363.)

e) Bilan

Chaque fois qu'il y a un courant induit, **le nombre de lignes de champ qui traversent la surface délimitée par le circuit conducteur varie dans le temps.**

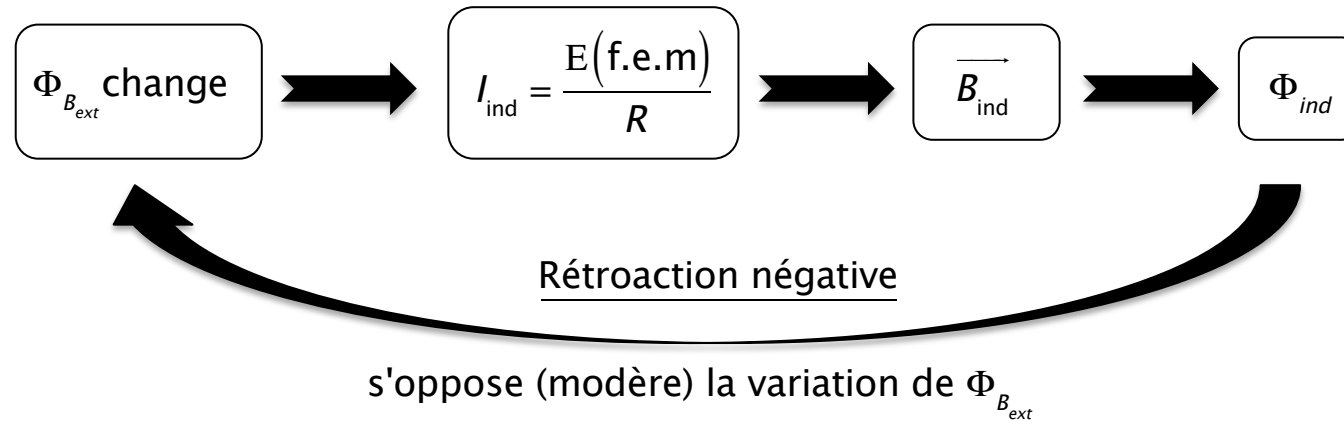
- ✓ Ce changement se faisant en raison d'une augmentation ou d'une diminution du champ magnétique lui-même,
- ✓ Ou en raison du mouvement du circuit dans l'espace.

3-La loi de Lenz et la loi de Faraday

a) Loi de modération de Lenz

Il y a un courant induit dans un circuit fermé conducteur si et seulement si le flux magnétique à travers ce circuit change dans le temps. La direction du courant induit est elle que le champ magnétique induit s'oppose à la variation du flux.

D'une autre façon, on peut dire que l'effet de la f.e.m induite est tel qu'il s'oppose à la variation du flux qui le produit.



Heinrich Friedrich Emil Lenz est un physicien allemand de la Baltique sujet de l'Empire Russe né à Dorpat dans le gouvernement d'Estland faisant partie de l'Empire Russe, le 12 février 1804. Il est mort à Rome le 10 février 1865.

Remarques:

- ✓ La loi de Lenz est empirique, elle correspond aux résultats des expériences, mais n'élucide pas leurs causes physiques.
- ✓ On peut seulement prédire le sens approprié du courant induit en éliminant un des deux sens impossible sur le plan énergétique.

Rappel: Définition de la f.e.m $E = \frac{W}{q}$ (en $J.C^{-1}$ ou V)

La f.e.m d'un dispositif correspond au travail par unité de charge accompli pour faire circuler celle-ci dans un circuit fermé.

3-La loi de Lenz et la loi de Faraday

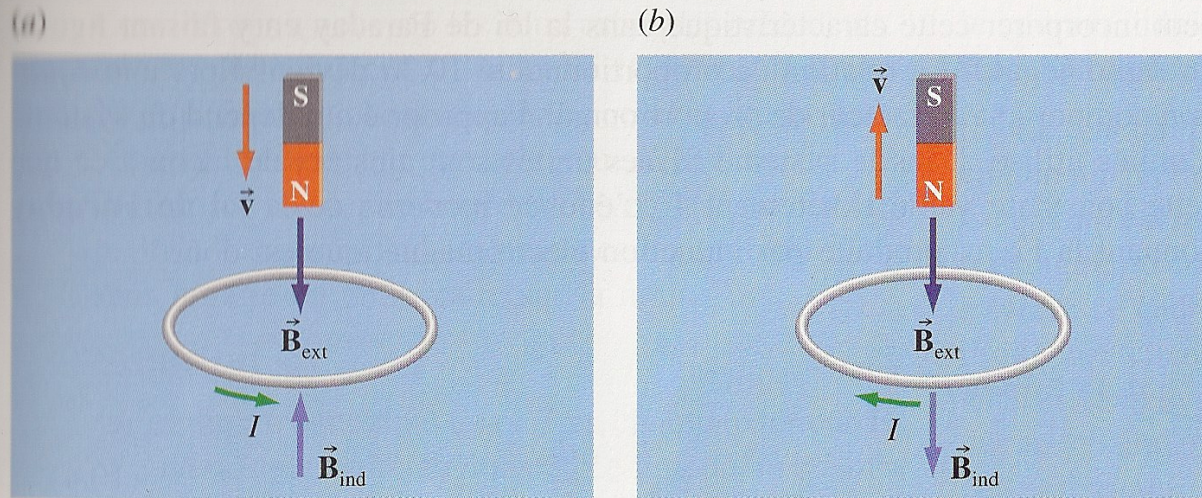
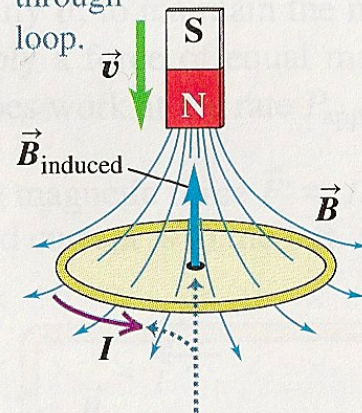


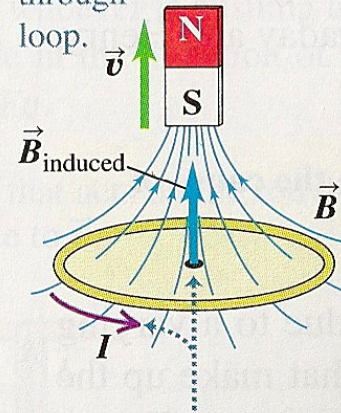
Figure 10.11 ◀

(a) Lorsque le flux à travers la boucle augmente, le flux correspondant au champ magnétique induit s'oppose à cette augmentation. (b) Lorsque le flux à travers la boucle diminue, le flux correspondant au champ magnétique du courant induit essaie de maintenir le flux traversant la boucle. Note : Les figures ne montrent que le champ magnétique existant sur l'axe du barreau aimanté et de la boucle.

(a) Motion of magnet causes *increasing downward flux* through loop.



(b) Motion of magnet causes *decreasing upward flux* through loop.



The induced magnetic field is *upward* to oppose the flux change. To produce this induced field, the induced current must be *counterclockwise* as seen from above the loop.

3-La loi de Lenz et la loi de Faraday

b) Loi de Faraday

ENONCE

Il nous faut à présent une loi qui nous donne l'expression de la f.e.m, ce que ne nous donne pas la loi de Lenz. C'est la loi de Faraday qui nous fournit une expression de la f.e.m.

$$\text{Loi de Faraday: } \mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

→ Si la résistance de la spire vaut R alors $I_{ind} = \mathcal{E}/R$

→ Si il y a N spires traversées par un flux magnétique identique alors: $\mathcal{E} = -N(d\Phi_B/dt)$ ou Φ_B est le flux traversant chaque spire.

CONVENTION DE SIGNE

Afin d'incorporer la loi de Lenz dans l'équation précédente, nous avons besoin d'une convention de signe pour fixer le signe de la f.e.m induite.

✓ Si un champ magnétique est initialement présent, on utilise notre main droite avec le pouce orienté dans le sens du champ magnétique. Le sens dans lequel notre doigt peuvent s'enrouler naturellement donne le sens du courant qui produirait **une f.e.m positive** (figure 10.12).

✓ Nous choisissons l'orientation du vecteur surface de façon à ce que le flux initial traversant la surface délimitée par la boucle soit positif (figure 10.12 et 10.13)

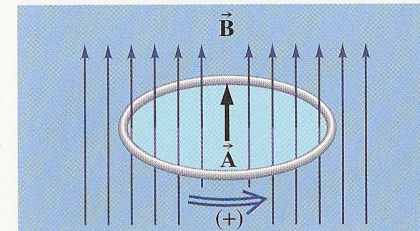
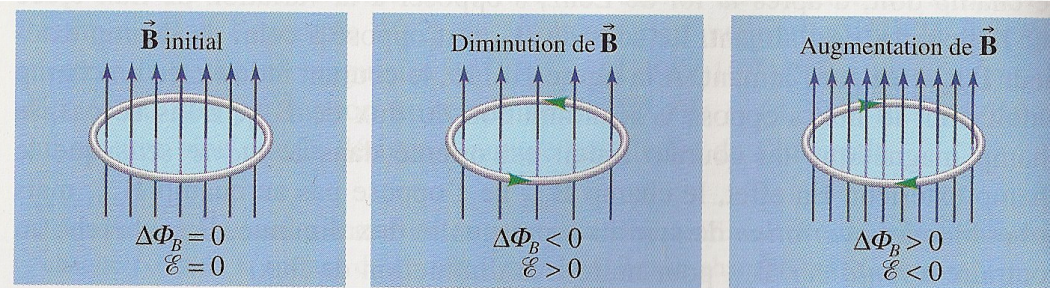


Figure 10.12 ▲

Le vecteur $\vec{A}$ et le sens positif sont déterminés par la règle de la main droite, le pouce étant pointé selon l'orientation du champ extérieur.

Figure 10.13 ►

Le signe de la f.e.m. induite est toujours opposé à celui de la variation de flux.



Exercice d'application 2

Un très long solénoïde comporte 10 spires/cm et a un rayon de 2 cm. Une bobine circulaire plane de rayon 4 cm et comportant 15 spires est placée autour du solénoïde, son plan étant perpendiculaire à l'axe du solénoïde (figure 10.17). Si le courant dans le solénoïde chute régulièrement de 3 A à 2 A en 0,05 s, quelle est la f.é.m. induite dans la bobine ?

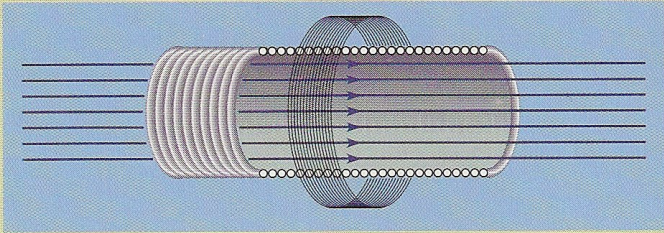


Figure 10.17 ▲

Une bobine entourant un long solénoïde parcouru par un courant variable. La bobine est le siège d'une f.é.m. induite bien que les lignes du champ magnétique soient confinées à l'intérieur du solénoïde.