

# Induction Electromagnétique

---

## CHAPITRE 3

# Lois

# d'induction

Dr N'CHO Janvier Sylvestre

---

# Introduction

---

Découverte expérimentalement par Faraday en 1831, l'induction est un phénomène électromagnétique que nous exploitons au quotidien. Elle est en effet à l'œuvre dans la quasi-totalité de la production du courant électrique, dans les moteurs de nos appareils électriques domestiques, les transformateurs qui équipent nos chargeurs d'appareils électroniques, les alternateurs de nos voitures, les freins des véhicules lourds, les microphones, les haut-parleurs....

**On a vu précédemment que les courants électriques génèrent des champs magnétiques, on va voir ici comment les champs magnétiques peuvent produire des courants, fondement du phénomène de l'induction**

---

# Flux

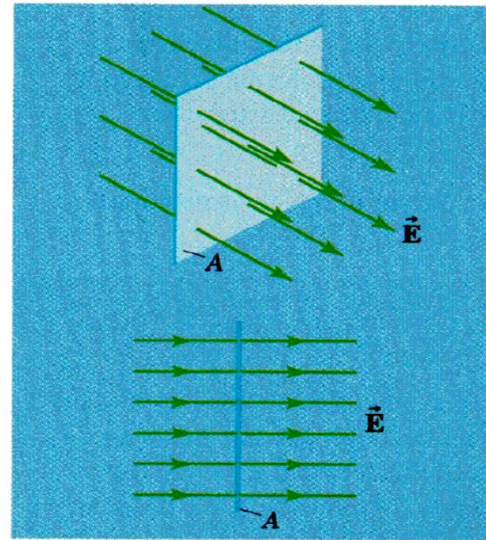
# Magnétique

# Flux d'un champ de vecteur (1)

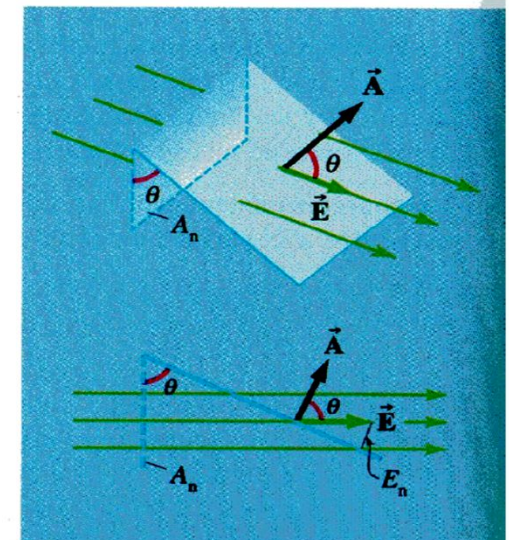
Le **flux d'un champ de vecteur** est une grandeur qui se rencontre souvent en sciences (dynamique des fluides, électromagnétisme). En ce qui vous concerne, vous allez rencontrer:

✓ Le flux du champ électrique dans l'équation de Maxwell-Gauss en MP.

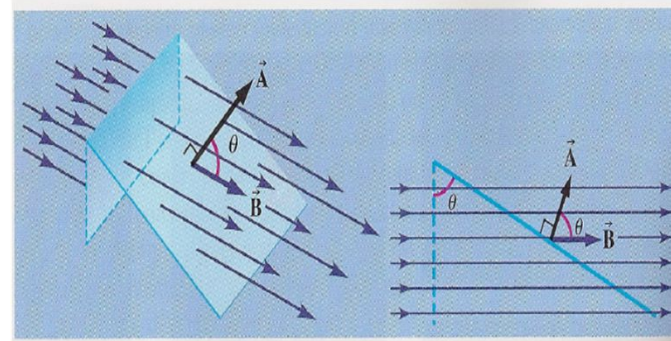
✓ Le flux du champ magnétique dans la loi de Faraday en MPSI puis dans l'équation de Maxwell-Faraday en MP.



**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.

# Flux d'un champ de vecteur (2)

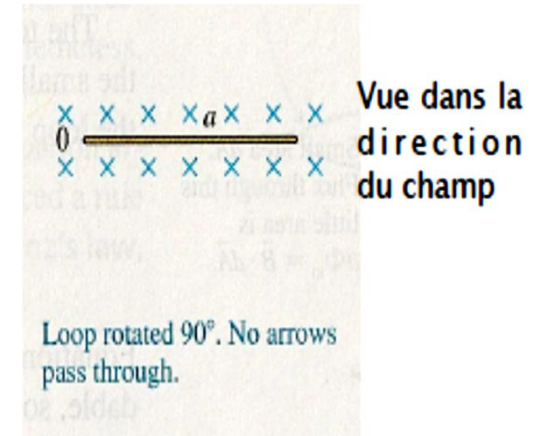
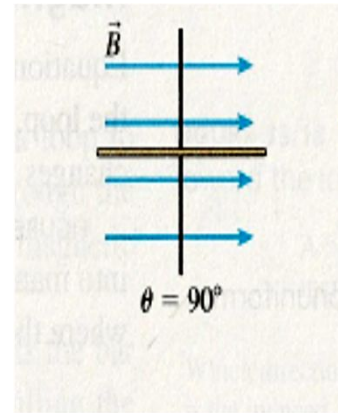
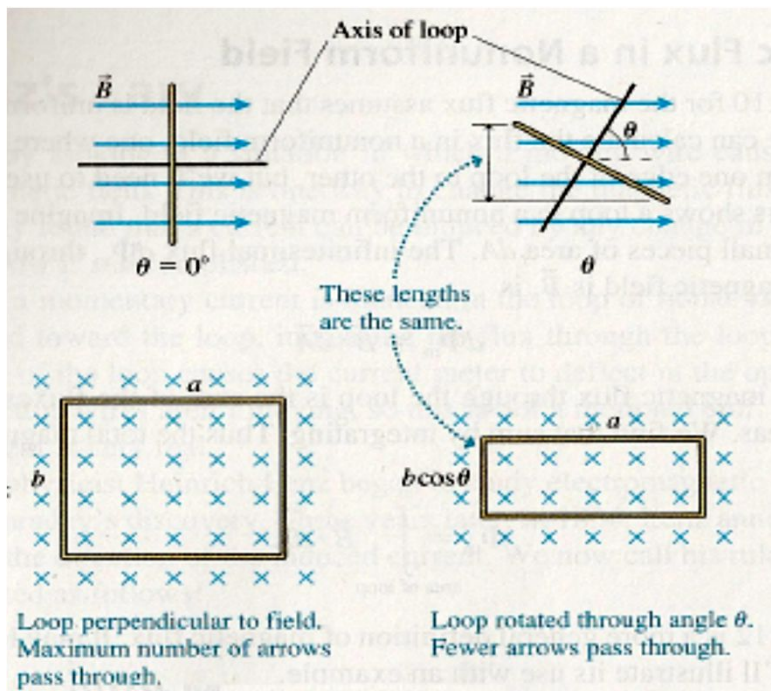
On peut faire une analogie entre les lignes de champ électrostatique qui traversent une surface et les lignes de courant d'un fluide qui s'écoulent à travers cette surface. Partant de cette analogie, Gauss a défini la grandeur appelée **flux du champ électrostatique**. La figure précédente représente une surface plane d'aire  $A$ , perpendiculaire aux lignes de champ uniforme. Par définition, le flux du champ électrostatique  $\phi_E$  qui traverse cette surface est :  **$\phi_E = EA$**

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

Si la surface est inclinée et fait un certain angle avec le champ (figure 3.3 précédente), 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 la surface  $A_n$  c'est-à-dire :

$$\phi_E = E_n A = EA_n$$

# Flux d'un champ de vecteur (3)



$$\Phi_E = \vec{E} \cdot \vec{A} \quad \text{Flux pour un champ électrique uniforme à travers une surface plane}$$

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A} \quad \text{Flux pour un champ magnétique uniforme à travers une surface plane}$$

# Orientation d'une surface

Le choix d'un vecteur surface, **dans un sens ou l'autre est un choix arbitraire**, qu'il faut toujours préciser sur un schéma avant de commencer les calculs. Dans le cas d'une surface délimitée par un contour plan, ce choix est lié au choix d'un sens de parcours le long du contour. Prenons une surface plane et traçons une courbe fermée dessus, par exemple un cercle comme sur la figure ci contre

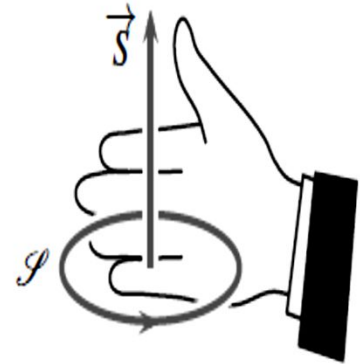


Figure 28.3 - Surface orientée, vue de profil, et vecteur surface.

Orienter la surface revient à choisir un sens de parcours positif sur cette courbe fermée. Une fois le sens de parcours choisi, on utilise la règle de main droite. Le pouce indique alors le sens du vecteur surface quand le sens positif sur le contour va de la base des doigts vers leur extrémité.

**Remarque : l'orientation de la surface, donc l'orientation du vecteur surface, permet de compter positivement le flux magnétique quand le champ magnétique traverse la surface dans la même direction que  $\vec{S}$  négativement dans le cas contraire.**

---

# Expérience induction électromagnétique



# Mise en évidence expérimentale (1)

---

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.é.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.

# Mise en évidence expérimentale (2)

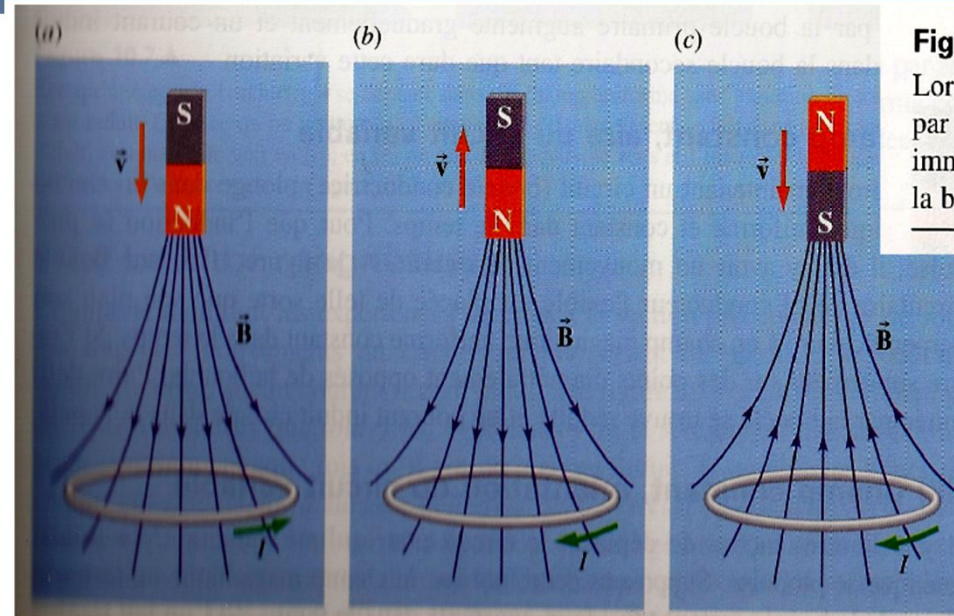


Figure 10.3 ◀

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

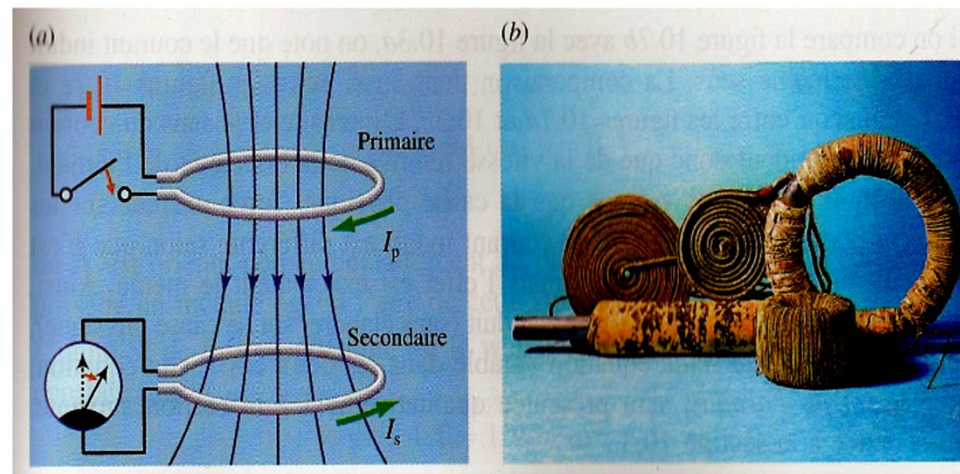


Figure 10.4 ◀

(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.

a) Circuit immobile, champ magnétique variable dans le temps

# Mise en évidence expérimentale (3)

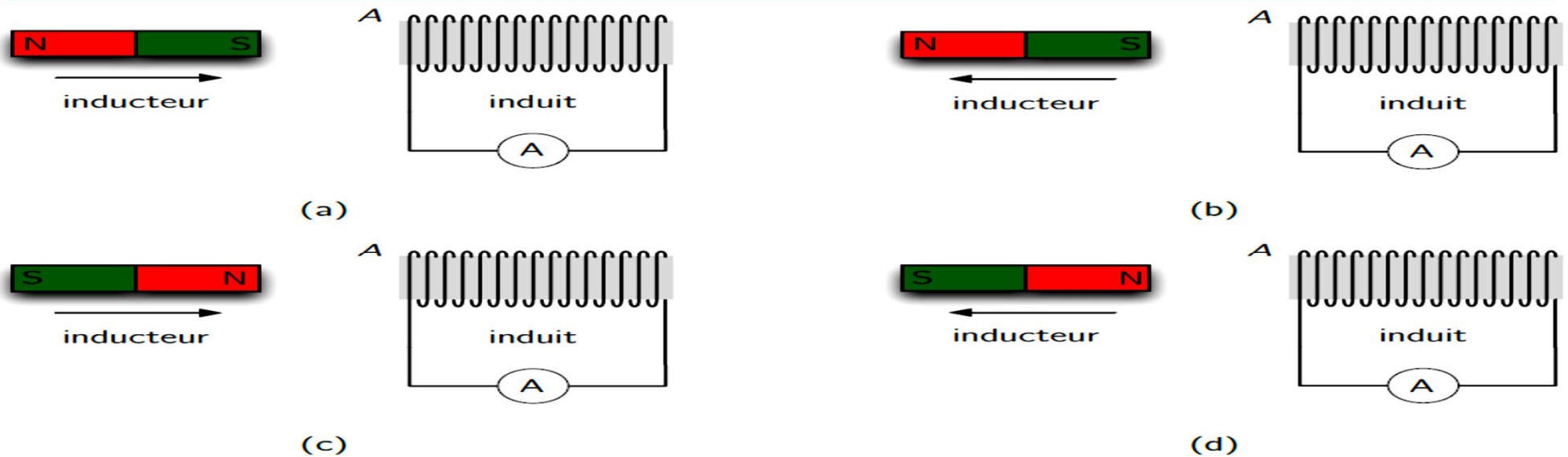


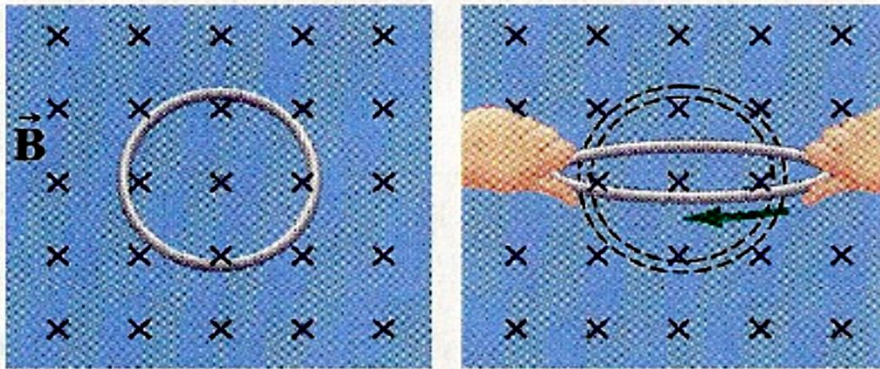
Figure 4.3 – Induction avec déplacement

Lorsqu'on :

- - approche un pôle sud de A : (figure 4.3a) un courant induit circule dans le sens tel que en A apparaît une face sud ) $\Rightarrow$  répulsion.
- éloigne un pôle sud de A : (figure 4.3b) un courant induit circule dans le sens tel que en A apparaît une face nord ) $\Rightarrow$  attraction.
- approche un pôle nord de A : (figure 4.3c) un courant induit circule dans le sens tel que en A apparaît une face nord ) $\Rightarrow$  répulsion.
- éloigne un pôle nord de A : (figure 4.3d) un courant induit circule dans le sens tel que en A apparaît une face sud ) $\Rightarrow$  attraction.

# Mise en évidence expérimentale (4)

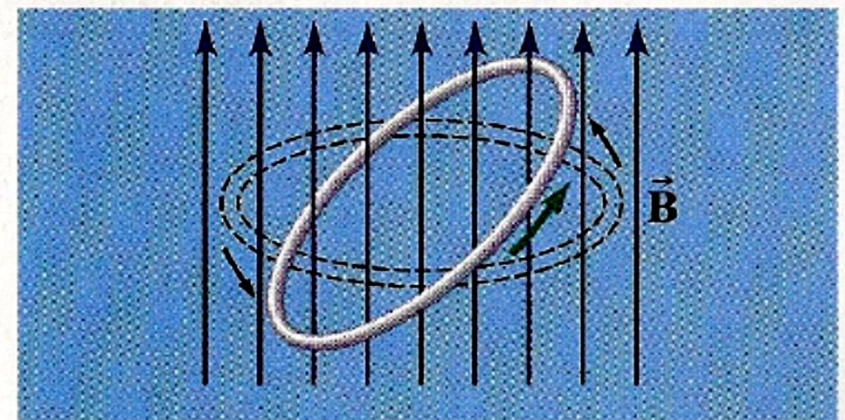
b) Champ constant, aire du circuit variable



**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.

# Mise en évidence expérimentale (5)

## d) Mouvement du circuit dans un champ non uniforme

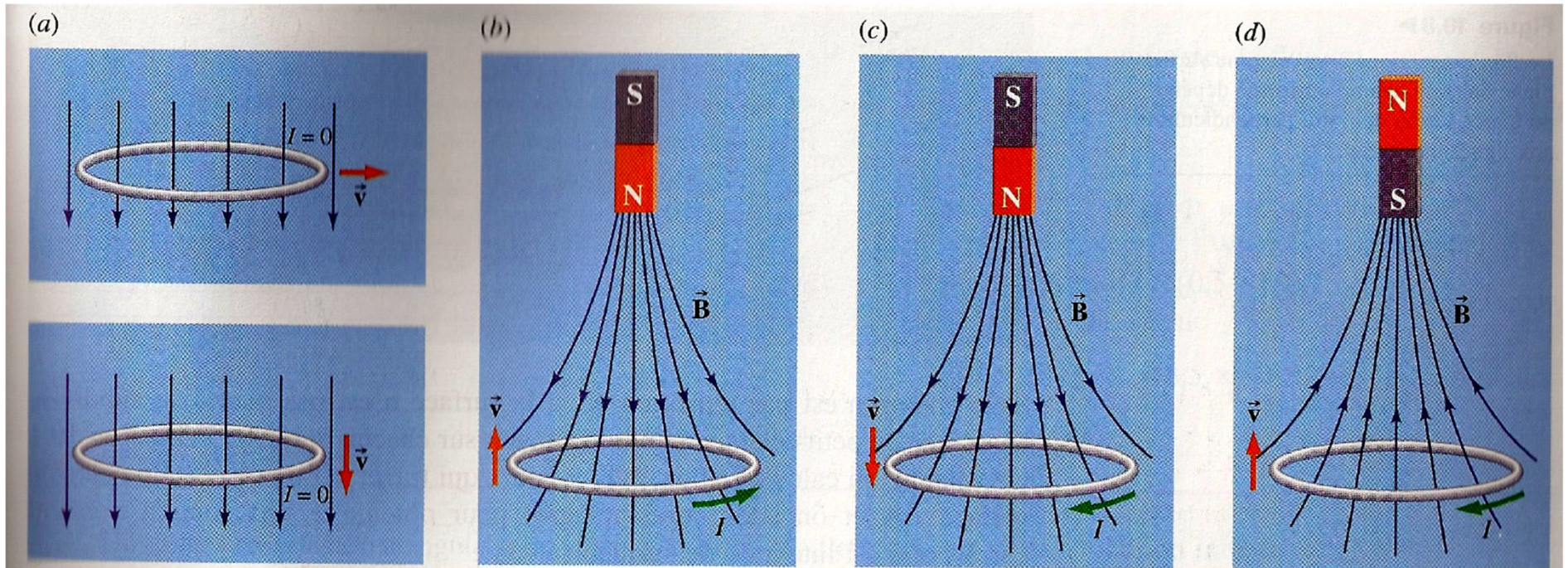
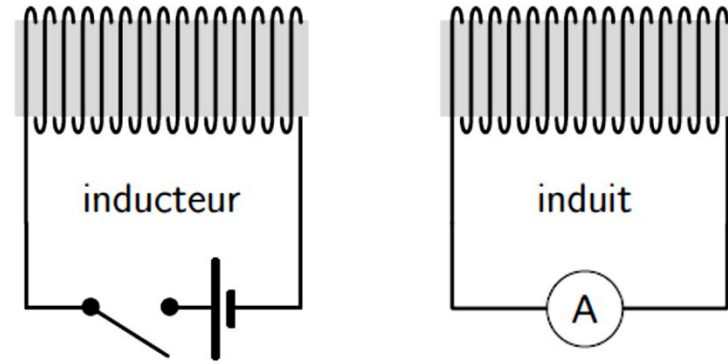
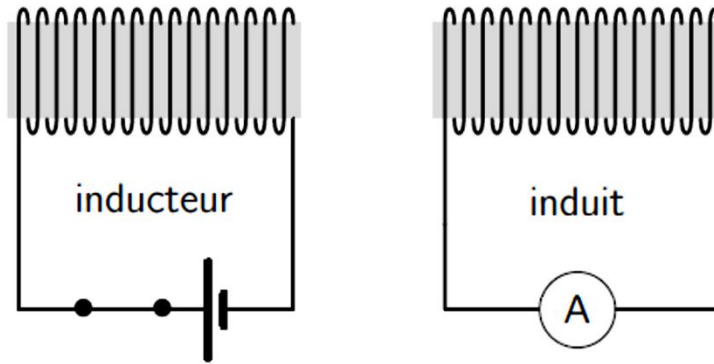


Figure 10.7 ▲

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.)

# Mise en évidence expérimentale (6)



## Fermeture du circuit inducteur

- le courant  $I$  s'installe dans le circuit inducteur et produit un champ magnétique  $\vec{B}$
- dans le circuit induit apparaît un courant  $i$  de sens opposé
- création dans l'induit d'un champ magnétique  $\vec{b}$  opposé à  $\vec{B}$

## Ouverture du circuit inducteur

- le courant  $I$  disparaît, de même que le champ magnétique  $\vec{B}$
- dans le circuit apparaît un courant induit  $i$  de même sens que  $I$
- création dans l'induit d'un champ magnétique  $\vec{b}$  de même sens que  $\vec{B}$

# Mise en évidence expérimentale (7)

---

## 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.
- ❑ Le phénomène d'induction traduit l'apparition d'un processus générateur dans le circuit. Or un générateur présente une tension à ses bornes y compris en circuit ouvert. Par conséquent même si le circuit n'est pas fermé, le phénomène d'induction existe, le courant induit qui y circule lorsqu'on ferme le circuit en est une manifestation.

# Définitions

---

- Un **courant induit** est un courant qui apparait dans un conducteur plongé dans un champ magnétique lors de la variation du flux magnétique qui le traverse soit du fait du déplacement ou de la déformation du circuit (**induction de Lorentz**), soit du fait de la variation temporelle du champ (**induction de Neumann**).
- Un **champ magnétique induit** est le champ magnétique généré par le courant induit dans un circuit.

*Les deux phénomènes d'induction (Lorentz et Neumann) peuvent aussi se superposer, si le conducteur se déplace dans un champ variable.*



---

# Loi de Lenz

# &

# Loi de Faraday

---

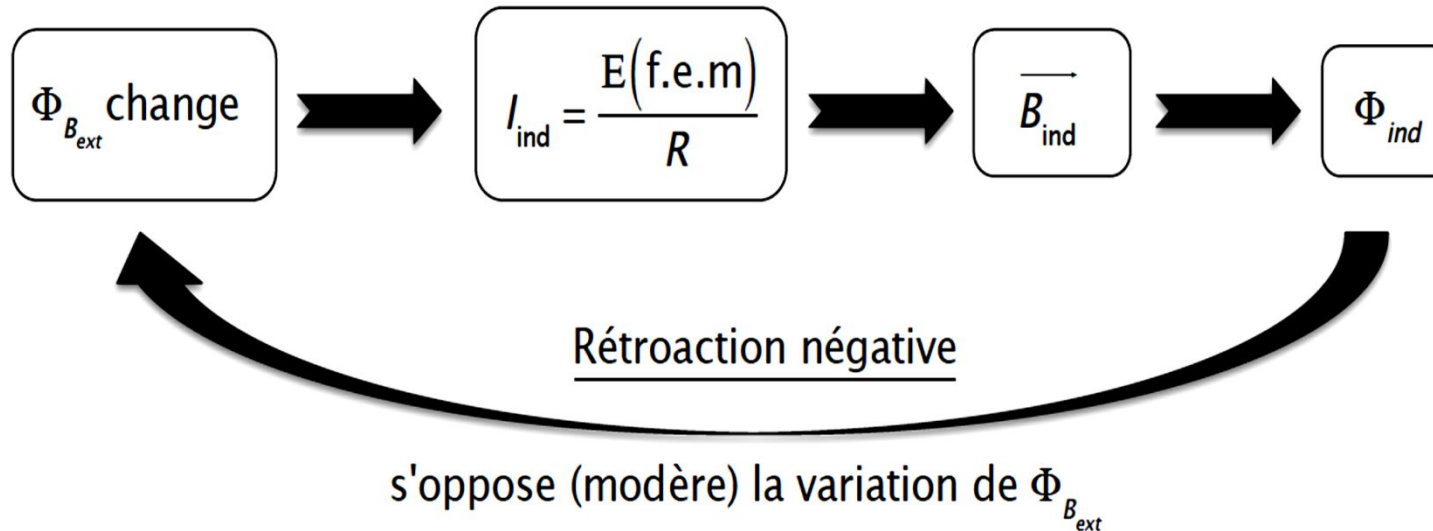
# Loi de modération de Lenz (1)

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.



# Loi de modération de Lenz (2)

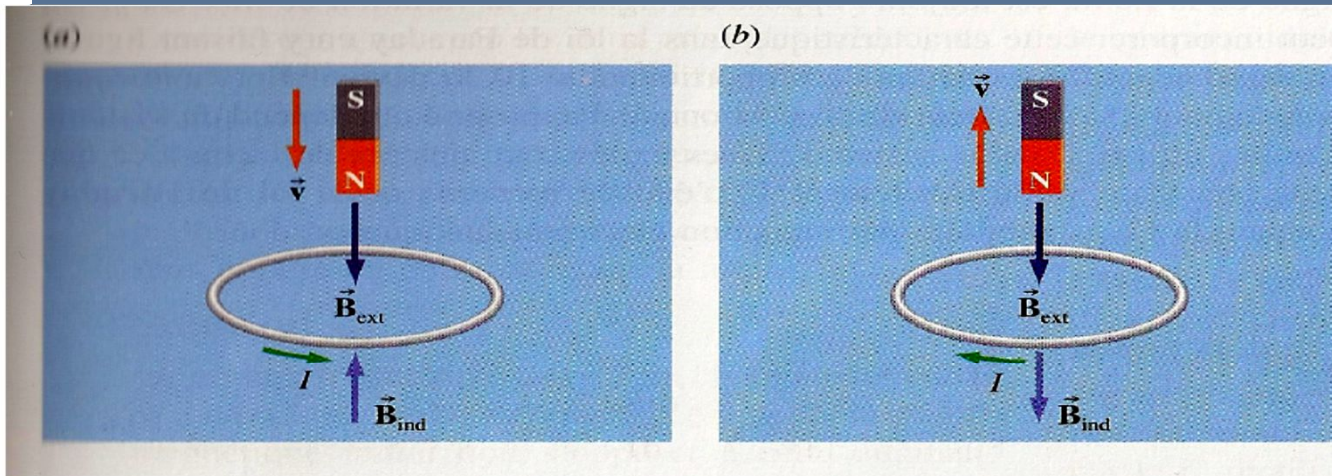
## Remarques:

- ✓ 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.

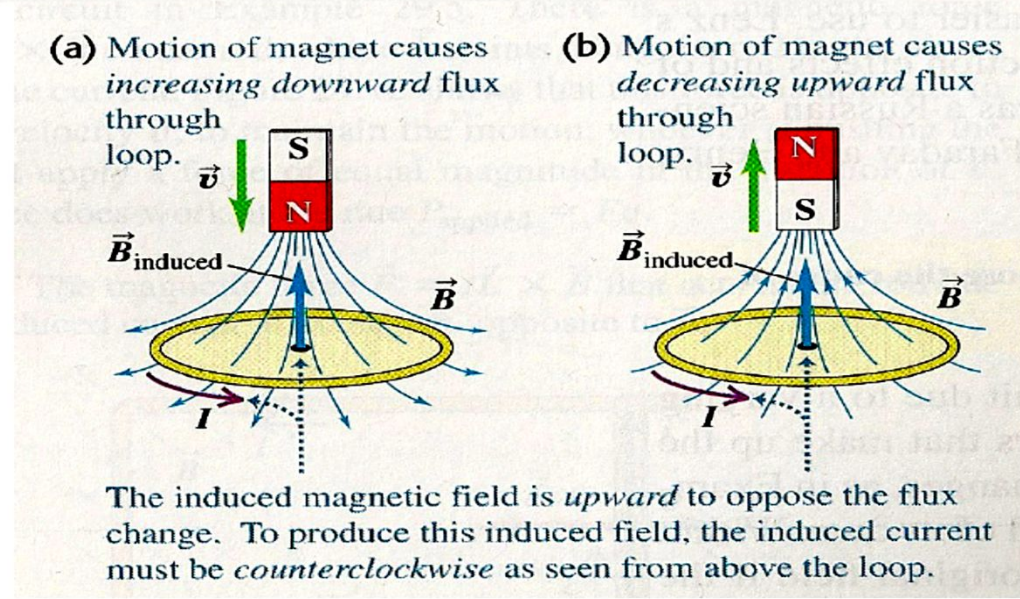
Rappel: Définition de la f.e.m  $E = \frac{W}{q}$  (en J.C<sup>-1</sup> ou V)

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

# Loi de modération de Lenz (3)



**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.



# Loi de Faraday (1)

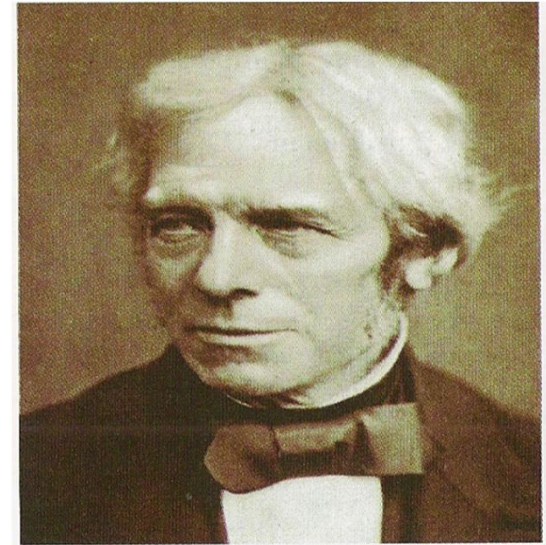
## Enonce

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.

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

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

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



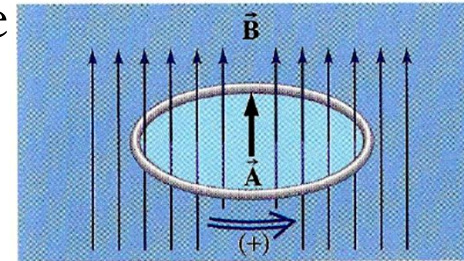
Michael Faraday (1791-1867) était l'un des 10 enfants d'un forgeron londonien. Dans sa jeunesse, après des études sommaires, il devint apprenti relieur. Mais il décida d'entrer « au service de la science » et il devint l'un des plus grands expérimentateurs de tous les temps.

# Loi de Faraday (2)

## 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 nos doigts peuvent s'enrouler naturellement donne le sens du courant qui produirait une f.e.m. positive (figure 10.12).

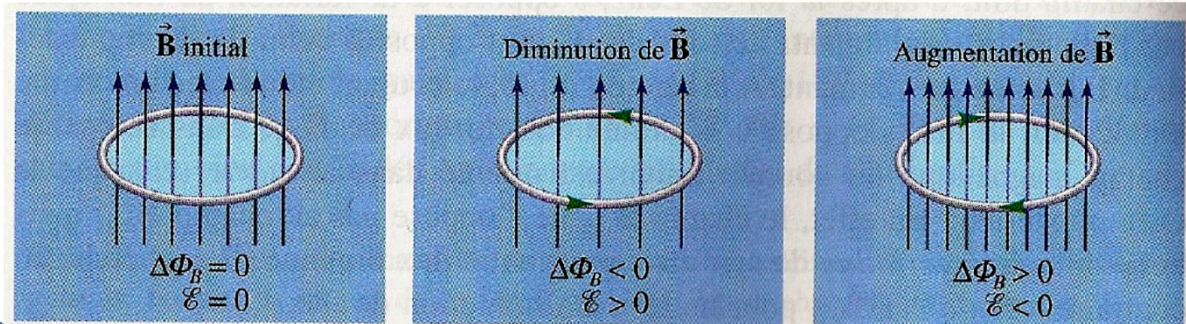


**Figure 10.12 ▲**  
Le vecteur  $\vec{A}$  et le sens positif sont déterminés par la règle de la main droite, le pouce étant pointé selon l'orientation du champ extérieur.

✓ 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 10.13 ►**

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



# Récapitulatif

Variation du flux	Évolution du champ qui traverse le circuit	Signes des grandeurs	Courant et champ induits
Le flux algébrique augmente.		$\phi > 0$ et $\frac{d\phi}{dt} > 0$ $\Rightarrow e < 0$ et $i < 0$ $\Delta \vec{B}$ ← $\vec{B}_{\text{induit}}$ ←	<p>Sens réel du courant induit (green arrow pointing up)</p> <p>Sens algébrique du courant induit (blue arrow pointing down)</p> <p><b>Le flux du champ induit tend à compenser l'augmentation du flux par un flux induit négatif.</b></p>
		$\phi < 0$ et $\frac{d\phi}{dt} > 0$ $\Rightarrow e < 0$ et $i < 0$ $\Delta \vec{B}$ ← $\vec{B}_{\text{induit}}$ ←	
Le flux algébrique diminue.		$\phi > 0$ et $\frac{d\phi}{dt} < 0$ $\Rightarrow e > 0$ et $i > 0$ $\Delta \vec{B}$ ← $\vec{B}_{\text{induit}}$ →	<p>Sens réel du courant induit (green arrow pointing up)</p> <p>Sens algébrique du courant induit (blue arrow pointing down)</p> <p><b>Le flux du champ induit tend à compenser la diminution du flux par un flux induit positif.</b></p>
		$\phi < 0$ et $\frac{d\phi}{dt} < 0$ $\Rightarrow e > 0$ et $i > 0$ $\Delta \vec{B}$ ← $\vec{B}_{\text{induit}}$ →	