

CHAPITRE IV

INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE

A. COURS

L'énergie électrique a transformé nos modes de vie et est devenu un acquis pour la plupart d'entre nous. Basculer un interrupteur pour avoir de la puissance électrique pour l'éclairage, le chauffage, la communication ou le divertissement, est un geste quotidien derrière lequel d'importants moyens humains, techniques et financiers sont mobilisés pour assurer notre tranquillité et notre confort. A chaque instant du jour et de la nuit, à chaque heure de la semaine, à chaque jour du mois et de l'année, dès qu'on allume un appareil, l'électricité doit être là, disponible. Aussi, le fournisseur d'électricité doit-il répondre instantanément à la quantité d'énergie demandée. Le réseau de distribution de l'électricité fournissant cette énergie dépend des centrales de production (nucléaires, thermiques, hydrauliques, éoliennes et photovoltaïques) où de grands générateurs convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique. Les principes physiques responsables de cette conversion seront l'objet de ce chapitre consacré à l'induction électromagnétique.

Jusqu'à présent, chaque fois que nous considérons un champ électrique, ce champ tirait son origine directement des charges électriques fixes. Dans ce chapitre, nous traiterons des champs électriques qui ne proviennent pas directement des charges électriques, mais qui ont pour origine un flux magnétique variable. Le phénomène est connu sous le nom **d'induction électromagnétique**, et son expression quantitative est la **loi de Faraday** du nom du grand expérimentateur anglais qui l'a découvert.

Au chapitre I, nous avons vu comment un champ magnétique peut dévier des particules chargées, et influencer un fil conducteur parcouru par un courant. Au chapitre II, nous avons vu qu'un courant électrique, ou bien des charges électriques en mouvement, génèrent un champ magnétique. Dans ce chapitre, nous verrons qu'un flux magnétique variable au cours du temps génère un champ électrique, et donc un courant électrique. Nous verrons que l'induction électromagnétique est essentielle à la vie industrielle moderne. C'est la base des générateurs et de nombreux moteurs. Sans elle la lumière n'existerait pas et ainsi la vie n'existerait pas.

Les lois de la physique présentent des symétries au niveau le plus basique. Aussi le soupçon de symétrie entre l'électricité et le magnétisme que nous avons trouvé dans les chapitres précédents sera développé dans ce chapitre. Nous verrons dans le prochain chapitre que cette symétrie s'avérera être un élément clé de la description unifiée de l'électricité et le magnétisme développée par Maxwell.

En étudiant ce chapitre, le lecteur devra comprendre la nature multiforme de l'induction électromagnétique. Aussi verra-t-il que la présence d'un champ magnétique variable impose la présence d'un champ électrique, et que réciproquement un champ électrique variable impose la présence d'un champ magnétique conformément aux exigences du principe de relativité. Il devra saisir les différences entre ces deux situations et relever leurs caractéristiques communes.

1. Les expériences de Faraday

Le phénomène d'induction électromagnétique est à l'origine de la majeure partie des courants électriques utilisés dans la vie courante et dans l'industrie. C'est l'un des principes fondamentaux à la base de la technologie moderne.

En effet, l'induction électromagnétique est à l'origine du fonctionnement des générateurs, des transformateurs et à la base de la production d'ondes électromagnétiques telles que, par exemple, la lumière et les ondes radio. Ainsi, les générateurs et les transformateurs électriques utilisent l'induction électromagnétique comme moyen de production et de distribution de l'énergie électrique de manière économique.

En outre, cette découverte est d'une importance fondamentale pour tous les appareils électriques et magnétiques que nous utilisons tous les jours, des ordinateurs aux Smartphones, de la télévision aux cartes de crédit, de la plus petite batterie au plus grand réseau électrique.

Les champs électriques et les champs magnétiques considérés jusqu'ici ont été produits respectivement par des charges fixes et des charges mobiles (courants). Appliquer un champ électrique sur un conducteur donne naissance à un courant qui à son tour génère un champ magnétique. On pourrait alors se demander si un champ électrique pourrait ou non être produit par un champ magnétique.

En utilisant quelques travaux de Hans Christian Oersted, Michael Faraday découvrit le premier, vers 1830, l'induction électromagnétique. Il démontra qu'un courant électrique pouvait être induit dans un circuit par un champ magnétique variable. La figure IV.1 illustre l'une des expériences de Faraday.

Les expériences les plus pertinentes pour l'induction électromagnétique ont été réalisées au cours des années 1830 par Michael **Faraday**, et indépendamment par Joseph **Henry**. Leurs travaux ont démontré qu'en faisant varier le champ magnétique avec le temps, un champ électrique pouvait être généré. Le phénomène est connu comme l'induction électromagnétique. L'induction électromagnétique permet à partir d'un travail mécanique de produire de l'énergie électrique.

Faraday a montré qu'aucun courant ne passe dans le galvanomètre lorsque le barreau aimanté est fixe par rapport à la boucle. Cependant, un courant est induit dans la boucle lorsqu'un mouvement relatif existe entre le barreau aimanté et la boucle. En particulier, le galvanomètre dévie dans une direction lorsque l'aimant s'approche de la boucle, et dans la direction opposée lorsqu'il s'éloigne.

L'expérience de Faraday démontre qu'un courant électrique est induit dans la boucle lorsqu'on change le champ magnétique. La bobine se comporte comme si elle était connectée à une source de force électromotrice. Expérimentalement, on trouve que la force électromotrice induite dépend de la vitesse de variation du flux magnétique à travers la bobine.

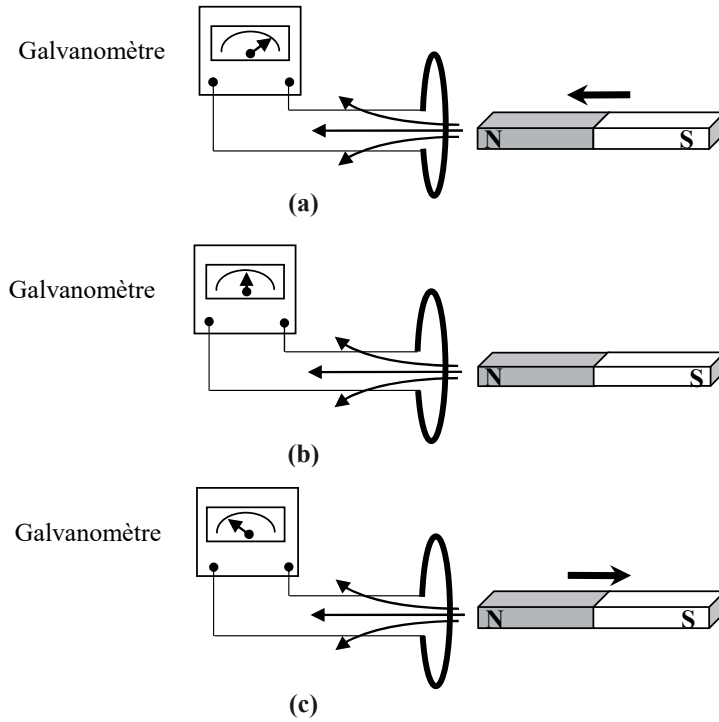


Fig. IV.1

2. Flux magnétique

Considérons un champ magnétique **uniforme** passant à travers une surface S , comme le montre la figure IV.2 ci-dessous.

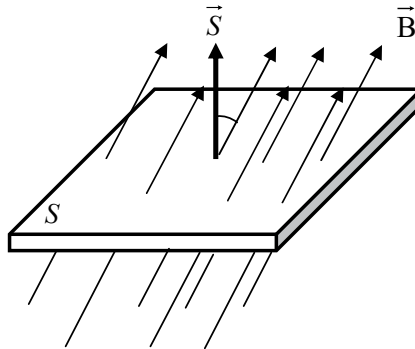


Fig. IV.2

Soit le vecteur surface $\vec{S} = S\vec{n}$, où S est l'aire de la surface S et \vec{n} son vecteur unitaire normal. Le flux magnétique à travers la surface S est donné par :

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{S} = B S \cos \theta$$

où θ est l'angle entre \vec{B} et \vec{n} .

- Le flux est maximal quand le champ magnétique \vec{B} est perpendiculaire à la surface S .

- Le flux est nul quand le champ magnétique \vec{B} est parallèle à la surface S.
- Le sens du vecteur unitaire normal \vec{n} à la surface S est donné par la règle de la main droite ou la règle du tire-bouchon.

Si le champ magnétique est **non uniforme**, alors Φ_B devient :

$$\Phi_B = \int_S d\Phi_B = \iint_S \vec{B} \cdot \vec{dS}$$

où \vec{dS} est un élément de la surface S.

Remarque : Sur une surface fermée, le flux du champ magnétique est toujours nul (Equation de Maxwell-flux).

$$\Phi_B = \iint_{S \text{ fermée}} \vec{B} \cdot \vec{dS} = 0$$

Dans le système international (SI), l'unité du flux est le weber (Wb) : 1 Wb = 1 T·m².

3. Loi de Faraday de l'induction

La loi de Faraday de l'induction électromagnétique peut être énoncée comme suit: La force électromotrice induite dans un circuit fermé est proportionnelle **au taux de variation** du flux du champ magnétique traversant la surface délimitée par le circuit par **rapport au temps** :

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Il y a trois possibilités :

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = \begin{cases} > 0 & \Rightarrow \text{La f.é.m. induite } \mathcal{E} < 0 \\ < 0 & \Rightarrow \text{La f.é.m. induite } \mathcal{E} > 0 \\ = 0 & \Rightarrow \text{La f.é.m. induite } \mathcal{E} = 0 \end{cases}$$

- La f.é.m. induite dans une bobine constituée de N spires est N fois plus grande :

$$\mathcal{E} = - N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad [V]$$

- Le signe « moins » présent dans cette loi, est dû au fait que l'induction produit des effets qui s'opposent à leurs causes. Il indique qu'il y a **opposition** entre la f.é.m. induite (**les effets**) et la variation du flux (**les causes**). C'est ce que nous verrons au paragraphe suivant.

■ Le flux magnétique Φ_B à travers une surface S est proportionnel au nombre de lignes de champ qui traverse cette surface S.

■ L'induction électromagnétique est la **création d'une source de tension** dans un circuit en utilisant un **flux magnétique variable**.

En combinant les expressions du flux magnétique et de la f.é.m. induite, on obtient pour un champ magnétique \vec{B} :

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = \frac{d}{dt} (B S \cos \theta) = \left(\frac{dB}{dt} \right) S \cos \theta + B \left(\frac{dS}{dt} \right) \cos \theta + B S \sin \theta \frac{d\theta}{dt}$$

Ainsi, nous voyons qu'une force électromotrice peut être induite des manières suivantes:

a. **Variation de l'intensité du champ magnétique \vec{B} avec le temps** (comme le montre la figure IV.3).

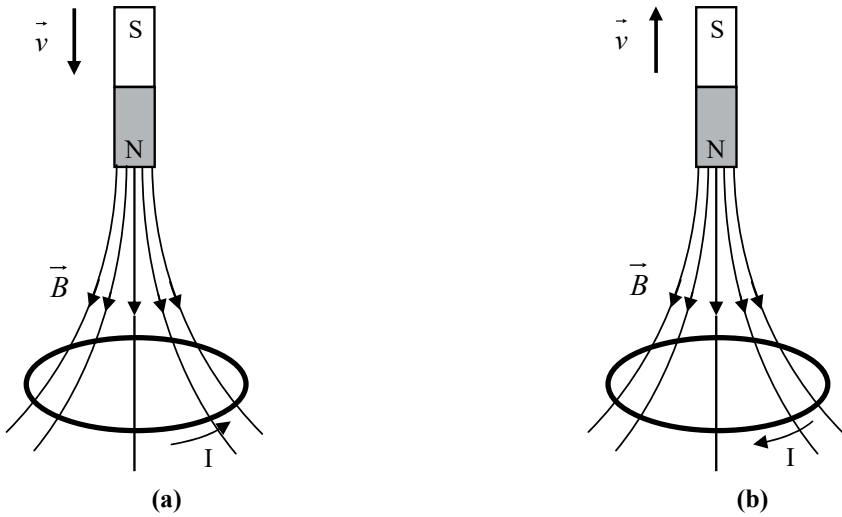


Fig. IV.3

Il y a création d'un courant induit si le nombre de lignes de champ qui traversent la surface délimitée par la boucle conductrice varie dans le temps.

b. **Variation de l'aire S, c.-à-d., la zone délimitée par la boucle conductrice avec le temps** (comme le montre la figure IV.4).

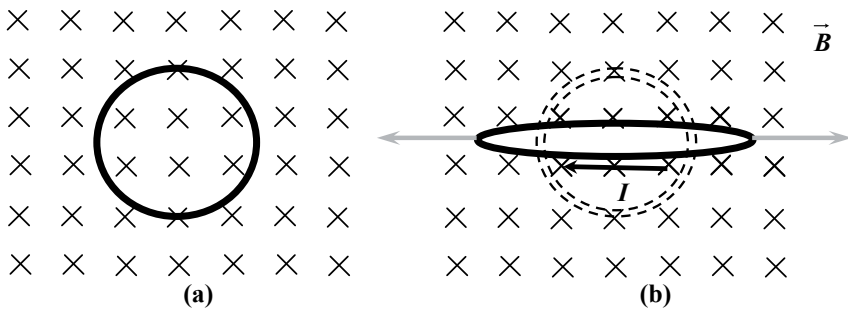


Fig. IV.4

c. **Variation de l'angle θ entre \vec{B} et le vecteur unitaire normal \vec{n} avec le temps** (comme le montre la figure IV.5).

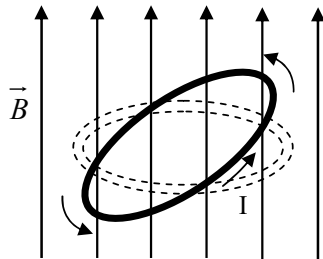


Fig. IV.5

d. Variation de la position de la boucle conductrice par rapport au champ \vec{B} (comme le montre la figure XIV.6).

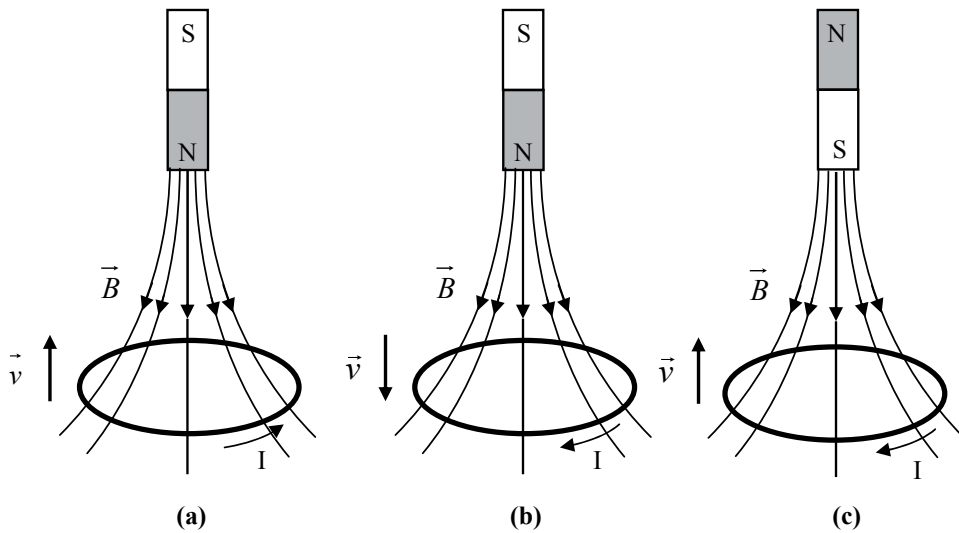


Fig. IV.6

- ▶▶ Le taux de variation du flux magnétique dépend donc de trois facteurs: la variation de la densité du flux magnétique, la variation de l'aire de la surface à considérer et le temps nécessaire pour que le flux varie.
- ▶▶ Le courant induit est :

$$I_{\text{induit}} = \frac{\mathcal{E}}{R_{\text{spire}}}$$

- ▶▶ La puissance électrique dissipée dans la boucle conductrice est :

$$P_{\text{dissipée}} = R_{\text{spire}} \cdot (I_{\text{ind}})^2 = \frac{\mathcal{E}^2}{R_{\text{spire}}}$$

Remarque :

Si le champ magnétique \vec{B} , l'aire S de la boucle et l'angle θ ne varient pas, alors la f.é.m. induite \mathcal{E} est nulle. Par conséquent, le courant induit I_{ind} est aussi nul.

4. Loi de modération de Lenz

Tous les phénomènes physiques obéissent à un principe fondamental: le principe de la conservation de l'énergie. Une force électromotrice ne peut pas exister sans cause. Chaque fois qu'un courant induit produit de la chaleur ou effectue un travail mécanique, l'énergie nécessaire doit provenir du travail effectué pour induire le courant. La relation significative entre un courant induit et la cause qui lui a donné naissance a été étudiée pour la première fois par H. F. E. **Lenz**³⁶. En 1834, il a formulé la loi suivante, connue sous le nom de loi de Lenz, qui s'applique à tous les courants induits.

Chaque fois qu'une force électromotrice est induite, le courant induit doit être dans

³⁶ Heinrich Friedrich Emil **Lenz** (1804 – 1865) : physicien russe d'origine germano-balte.

une direction telle qu'elle s'oppose à la variation du flux magnétique qui le produit. D'une autre façon, on peut dire que le sens du courant induit qui apparaît dans le circuit induit est tel qui tend à s'opposer à la cause qui l'a créé par l'inducteur.

L'induction électromagnétique agit toujours pour s'opposer à la cause qui l'engendre. La loi de Lenz établit une règle pour déterminer la direction d'un courant induit dans une spire conductrice. Un courant induit aura une direction telle que le champ magnétique dû au courant induit s'oppose à la variation du flux magnétique qui induit le courant. Comme le courant descend les potentiels à travers un conducteur ohmique, la direction du courant induit peut être utilisée pour déterminer les emplacements de potentiel supérieur et inférieur.

La direction du courant induit est déterminée par la loi de Lenz :

Un conducteur en mouvement relatif par rapport à un champ magnétique est le siège d'un courant induit, ce courant génère à son tour un champ magnétique qui s'oppose à celui qui lui a donné naissance.

Sous une forme plus concise, la loi de Lenz peut s'énoncer comme suit :

Le courant induit a toujours un sens tel qu'il s'oppose par ses effets à la cause qui lui a donné naissance.

On détermine la direction du courant induit en utilisant la règle de la main droite.

Avec le pouce pointant dans la direction de \vec{S} , on enroule les doigts autour de la boucle fermée. Le courant induit circule dans la même direction que le mouvement de rotation des doigts si $\varepsilon > 0$ et la direction opposée si $\varepsilon < 0$ comme le montre la figure IV.7.

- Le sens du courant induit (et donc de la f.é.m. induite) et l'orientation de la surface (utile pour le calcul du flux) sont cohérents avec le sens direct conventionnel.

La loi de Lenz s'applique aussi aux cas où les conducteurs sont fixes et le champ magnétique variable. Dans ce cas, les courants induits créent toujours un champ qui tend à s'opposer à la variation du champ extérieur qui leur a donné naissance.

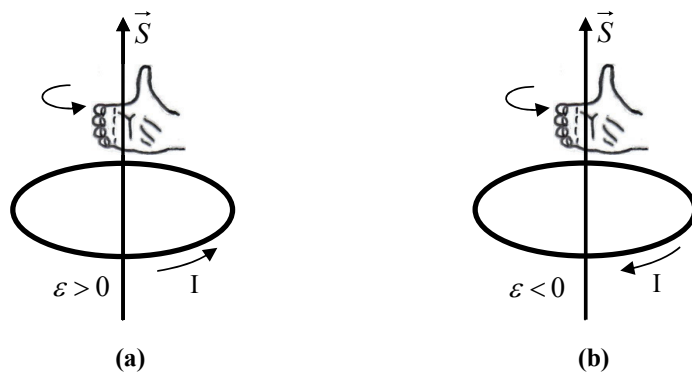


Fig. IV.7

Un phénomène d'induction électromagnétique peut se produire dans un circuit lors de la variation du flux magnétique, soit du fait de la variation temporelle du champ magnétique (**induction de Neumann**³⁷), soit du fait du mouvement ou de la déformation du circuit (**induction de Lorentz**) dans un champ magnétique

³⁷ Franz Ernst **Neumann** (1798 – 1895) : physicien allemand.

permanent. Si le circuit se déplace dans un champ magnétique variable, les deux types d'induction électromagnétique (Neumann et Lorentz) se superposent.

L'induction électromagnétique est un phénomène unique : l'induction de Lorentz et l'induction de Neumann en sont deux aspects qui relèvent du choix du référentiel dans lequel on se place.

La Figure IV.8 montre comment la loi de Lenz est utilisée pour déterminer la direction du courant induit I . Dans tous les cas, on remarque que le champ magnétique (induit) s'oppose aux variations du champ magnétique (inducteur) qui a donné naissance à l'induction.

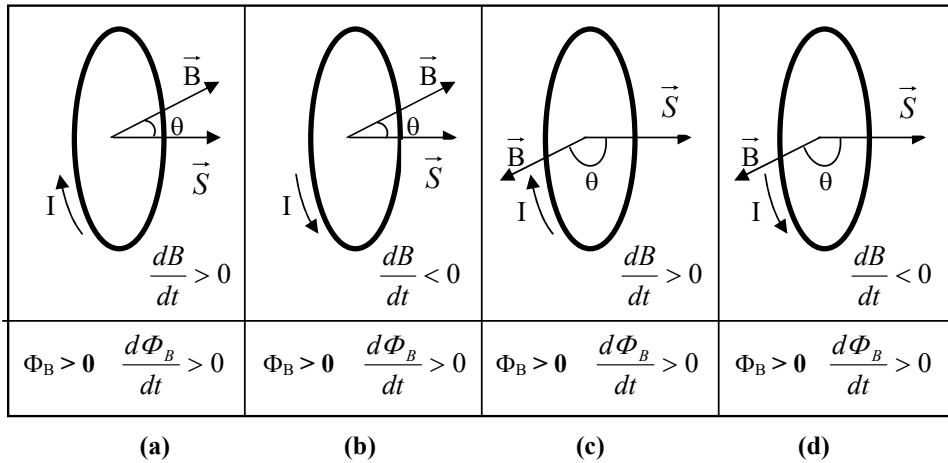


Fig. IV.8

5. F.é.m. due au mouvement relatif d'un conducteur et d'un champ magnétique

Considérons un barreau conducteur de longueur l se déplaçant à travers un champ magnétique \vec{B} uniforme perpendiculaire au plan du dispositif et qui pointe dans la page, comme le montre la figure IV.9. Les particules de chaque charge $q > 0$, à l'intérieur du barreau, subissent l'action d'une force magnétique $\vec{F}_b = q\vec{v} \wedge \vec{B}$ qui tend à les pousser vers le haut a , laissant des charges négatives sur l'extrémité inférieure b .

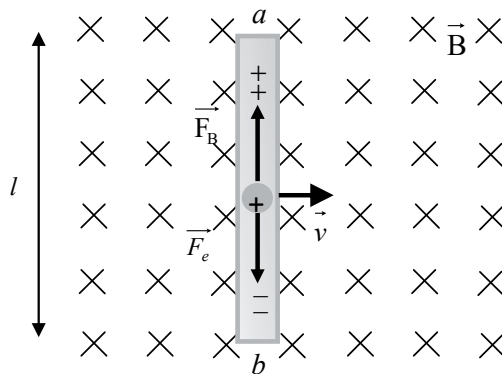


Fig. IV.9