

La technologie actuelle des machines électriques, des moteurs électriques aux microphones, repose principalement la **loi de Faraday**. Le but de ce chapitre est d'expliquer cette loi expérimentale, afin d'en étudier les applications dans les deux chapitres ultérieurs.

1 Flux magnétique

1.1 Définition du flux magnétique

On considère un champ magnétique \vec{B} uniforme et une spire rectangulaire, de surface S , située dans un plan orthogonal au champ. Quelle est la « quantité » de champ magnétique qui traverse la spire ? On choisit de nommer cette grandeur flux du champ magnétique, ou plus simplement **flux magnétique** ; on lui donne pour valeur $B \times S$, produit de la norme du champ par la surface de la spire offerte à ce champ.

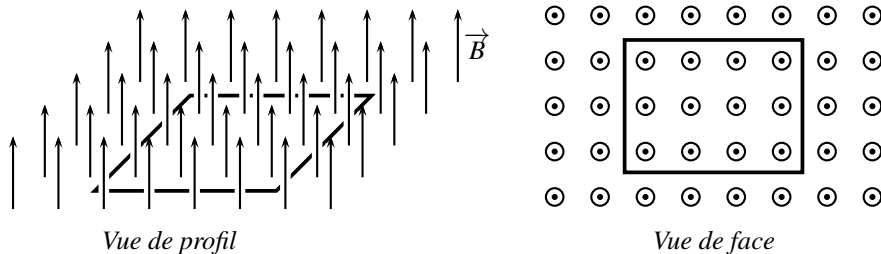


Figure 28.1 – Flux du champ magnétique à travers une surface.

La situation se complique lorsque la spire n'est plus orthogonale au champ, mais inclinée, comme dans le cas de la surface grisée dans le schéma de la page suivante. On voit immédiatement que si l'angle β est nul, alors le champ magnétique passe « au-dessus » et « en-dessous » de la surface grisée, mais pas à travers. Le flux magnétique est nul car la surface offerte au champ est nulle.

On est donc amené à évaluer la surface offerte au champ magnétique. Sur le schéma précédent, cette surface offerte est celle qui est orthogonale au champ, elle mesure $S \times \sin \beta$ ou

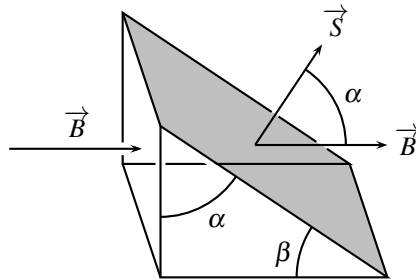


Figure 28.2 – Flux du champ magnétique à travers une surface inclinée (seuls deux vecteurs champ magnétique sont représentés, afin d'alléger la figure).

$S \times \cos \alpha$. Le flux magnétique est alors $B \times S \cos \alpha$.

Pour exprimer le flux par une formule générale on introduit un **vecteur surface** \vec{S} qui est :

- normal à la surface à travers laquelle on calcule le flux magnétique,
- de norme égale à l'aire S de cette surface.

Il faut remarquer qu'il y a deux possibilités pour le vecteur \vec{S} , c'est-à-dire deux orientations possibles de la surface. Sur la figure, on a choisi celle pour laquelle les vecteur \vec{B} et \vec{S} sont dans le même sens. L'angle entre \vec{S} et \vec{B} est α de sorte que : $B \times S \cos \alpha = \vec{B} \cdot \vec{S}$ (voir appendice mathématique).

La définition générale du flux magnétique est donc la suivante :

Le **flux magnétique** φ , à travers une surface orientée de vecteur surface \vec{S} , est :

$$\varphi = \vec{B} \cdot \vec{S}.$$

Le flux magnétique peut être positif ou négatif. C'est une grandeur algébrique dont le signe dépend du choix d'orientation de la surface.

1.2 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 28.3. 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 la 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.

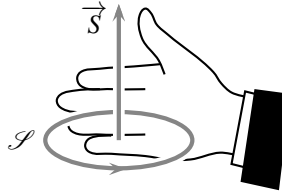


Figure 28.3 – Surface orientée, vue de profil, et vecteur surface.

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.

1.3 Unité de flux magnétique

L'unité de flux champ magnétique est le **weber**¹, de symbole Wb. Comment exprimer les webers dans les unités de base du Système International ? Dans le chapitre sur le champ magnétique, on montre que le tesla, unité du champ magnétique, est identique à des $\text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$. Ainsi :

$$\varphi = \vec{B} \cdot \vec{S} \quad \text{donc} \quad \text{Wb} = \text{T} \cdot \text{m}^2 = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}.$$

2 Expériences d'induction électromagnétique

2.1 Expérience historique de Faraday

En 1831, Faraday², se demanda si un champ magnétique pouvait être à l'origine d'un courant électrique, puisque la réciproque avait été mise en évidence quelques années plus tôt. Il réalisa l'expérience suivante :

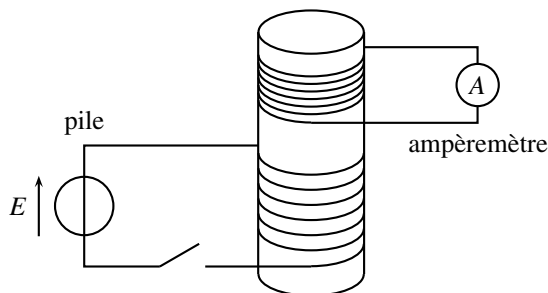


Figure 28.4 – Expérience de Faraday.

1. En l'honneur de Wilhelm Eduard Weber, 1804 – 1891, physicien allemand, professeur et directeur de l'observatoire de l'université de Göttingen, connu pour ses travaux sur l'électrodynamique.

2. Michael Faraday, 1791 – 1867, physicien anglais, célèbre pour ses travaux fondateurs en électromagnétisme. Il fut membre de la Royal Society, où il fonda les leçons du vendredi, toujours en vigueur. Il contribua aussi à l'étude de l'électrochimie, et fut professeur de chimie à l'académie militaire de Wollwich.

Deux enroulements de fils sur un cylindre en bois étaient reliés l'un à une pile par l'intermédiaire d'un interrupteur, l'autre à un ampèremètre. Dans un premier temps, Faraday espérait mesurer un courant avec l'ampèremètre en alimentant le premier enroulement pour créer un champ magnétique. Quand l'interrupteur était fermé, il n'observait rien. Il se rendit compte cependant que l'aiguille de l'ampèremètre déviait dans un sens, de manière très brève, à la fermeture de l'interrupteur et dans l'autre sens à l'ouverture. Pour amplifier le phénomène, il utilisa une batterie de plusieurs piles et remplaça le cylindre en bois par un cylindre en fer doux. Il arriva à la conclusion que c'était la **variation** du courant dans le premier circuit qui était à l'origine du courant électrique détecté dans le second. Il publia ses résultats en 1831. Pour l'anecdote, le physicien américain, Joseph Henry, avait fait presque la même expérience un an plus tôt mais n'avait pas publié ses résultats.

Faraday utilisa cette découverte pour construire le premier générateur électrique de courant alternatif, qui fut l'une des plus importantes innovations de l'époque.

2.2 Expériences avec un aimant et une bobine

On effectue l'expérience suivante : une bobine est reliée à un ampèremètre. On approche un aimant, le pôle nord de celui-ci avançant vers la bobine. On constate l'apparition d'un courant dans la bobine dans le sens indiqué sur la figure suivante ; ce courant est appelé courant induit. Quand on retire l'aimant, le sens du courant s'inverse. Si maintenant on avance le pôle sud de l'aimant vers la bobine, le sens du courant est le même que si on éloigne le pôle nord. On observe que l'intensité du courant qui apparaît dans la bobine est d'autant plus grande que l'aimant avance vite.

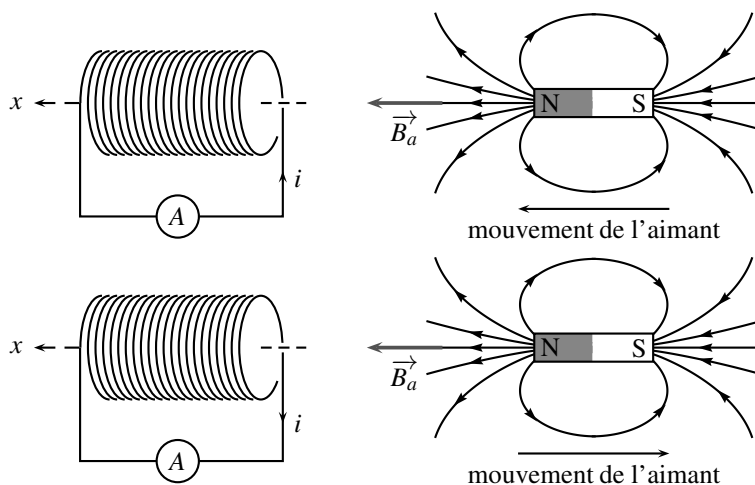


Figure 28.5 – Courant induit par un aimant en déplacement.

Si on déplace la bobine au lieu de l'aimant, les résultats sont identiques : le sens du courant est le même que l'on approche la bobine de l'aimant fixe, ou que l'on approche l'aimant de la bobine fixe.

Si on remplace l'aimant par une bobine alimentée en courant continu, on observe encore un courant dans l'autre bobine non alimentée. Le courant induit dans la deuxième bobine est de sens opposé au courant dans la première bobine quand on rapproche les deux bobines et de même sens quand on les éloigne.

Remarque

On peut réaliser toutes ces expériences en mettant la bobine en circuit ouvert. Dans ce cas, on la relie à un voltmètre ou à un oscilloscope. On mesure alors au lieu d'un courant induit une tension induite entre les bornes de la bobine. Le signe de cette tension dépend de l'orientation de l'aimant et de son sens de déplacement de la même manière que le sens du courant induit.

2.3 Le phénomène d'induction électromagnétique

Ces expériences mettent en évidence le phénomène d'**induction électromagnétique** qui se manifeste par l'apparition d'un courant dans un circuit fermé ou d'une tension aux bornes d'un circuit ouvert, sans qu'il y ait de générateur à l'intérieur de ces circuits. Une condition pour voir ce phénomène est que *la champ magnétique « traversant le circuit » varie*. Cette variation peut provenir, soit d'une variation du champ magnétique, soit d'un déplacement du circuit dans un champ magnétique non uniforme. Les deux cas sont illustrés dans les expériences précédentes.

Il peut y avoir un phénomène d'induction dans les deux cas suivants :

1. Le circuit est fixe dans un champ magnétique qui dépend du temps ;
2. Le circuit est en mouvement dans un champ magnétique stationnaire.

2.4 Loi de Lenz

On sait que le champ magnétique d'un aimant sort par le pôle nord, comme le montre la figure 28.5. Il est plus intense près des pôles de l'aimant, là où les lignes de champ se resserrent.

Lorsque le pôle nord de l'aimant s'approche de la bobine, le champ magnétique vu par celle-ci augmente suivant $\oplus \vec{u}_x$. En effet, on approche les zones de fort champ de la bobine. Un courant induit apparaît dans le sens indiqué sur la figure ; ce courant crée, d'après la règle de la main droite, un champ magnétique porté par $\ominus \vec{u}_x$, afin de diminuer le champ dans la bobine qui augmente.

Lorsque le pôle nord de l'aimant s'éloigne de la bobine, le champ magnétique vu par celle-ci suivant $\oplus \vec{u}_x$ diminue. Le courant induit crée, d'après la règle de la main droite, un champ magnétique porté par $\oplus \vec{u}_x$, afin de renforcer le champ dans la bobine qui diminue. Dans chaque cas, le courant induit crée un champ magnétique qui s'oppose à la variation de celui de l'aimant. Cette loi expérimentale est connue sous le nom de loi de Lenz³.

D'après la **loi de Lenz**, les phénomènes d'induction s'opposent, par leurs effets, aux causes qui leur ont donné naissance.

3. En l'honneur de son découvreur, Heinrich Friedrich Emil Lenz, 1804 – 1865, physicien balte d'origine allemande, sujet russe, professeur puis recteur à l'université de Saint Pétersbourg.

3 Loi de Faraday

3.1 Règle du flux

Dans toutes les expériences décrites plus haut, une *variation du flux magnétique* φ à travers le circuit provoque l'apparition d'un courant dans celui-ci.

En 1831, Faraday déduisit de ses expériences la **loi de Faraday** : le courant induit dans le circuit est égal à celui que produirait un générateur fictif, dit générateur induit, dont la force électromotrice e est donnée par la formule :

$$e = - \frac{d\varphi}{dt}.$$

e est appelée **force électromotrice induite**, en abrégé f.é.m. induite.

3.2 Convention d'algébrisation

Si l'on veut étudier un circuit électrique qui est le siège d'un phénomène d'induction électromagnétique, il faut ajouter dans le schéma électrocinétique le générateur induit. Dans quel sens doit-on placer la flèche de ce générateur ? La réponse est donnée par le schéma ci-dessous : la flèche du générateur induit doit être mise dans le sens positif conventionnel pour le courant i dans le circuit.

La f.é.m. induite e est comptée positive dans le sens conventionnel positif du courant.

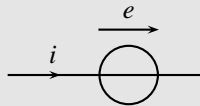


Figure 28.6 – Convention d'algébrisation générateur induit.

Ceci correspond à une **convention générateur**.

3.3 Exceptions à la règle du flux

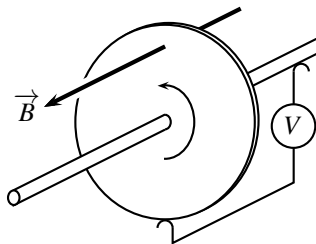


Figure 28.7 – Roue de Barlow.

On considère tout d'abord le cas d'un circuit dans lequel une f.é.m. est induite, mais sans variation de flux : la roue de Barlow. Un disque de surface S tourne autour de son axe. L'ensemble est en métal conducteur et plongé dans un champ magnétique uniforme et stationnaire. Deux contacts glissants relient le centre du disque à sa périphérie pour mesurer, avec un voltmètre, la f.é.m. induite.

Le flux du champ magnétique \vec{B} à travers la roue de surface S est simplement BS . Ce flux reste constant lors du mouvement de la roue, alors qu'on observe expérimentalement une f.é.m. différente de 0. La loi de Faraday n'est ici pas applicable.

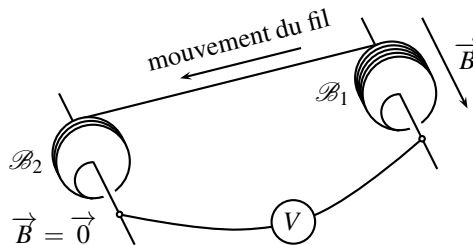


Figure 28.8 – Expérience d'André Blondel.

On considère maintenant le cas, assez rare, d'un circuit où nulle f.é.m. n'est induite alors que le flux du champ magnétique varie au cours du temps : l'expérience d'André Blondel⁴. Deux bobines, B_1 et B_2 , tournent autour de leurs axes, qui restent parallèles. On déroule une bobine afin d'enrouler le fil électrique sur l'autre, comme le montre le schéma. Deux contacts, placés sur les axes des spires, permettent de mesurer la f.é.m. induite au moyen d'un voltmètre. La bobine B_1 est placée dans une région où règne un champ magnétique uniforme et stationnaire, parallèle à son axe. La bobine B_2 est dans une zone de l'espace sans aucun champ magnétique.

Si l'on note n_1 le nombre de spires de la bobine B_1 , alors n_1 diminue au cours du temps lorsqu'on la déroule. Le flux du champ magnétique \vec{B} à travers les n_1 spires de la bobine B_1 , chacune de surface S , vaut n_1BS . Bien que ce flux varie au cours du temps, nulle f.é.m. n'est expérimentalement induite.

Dans ce cas, le circuit électrique ne coupe aucune ligne de champ magnétique. Lors de son mouvement, il passe « entre les lignes de \vec{B} ».

3.4 Loi de Faraday

Compte tenu des exceptions développées dans le précédent paragraphe, on admet la formulation générale de la loi de Faraday.

4. 1863 – 1938, ancien élève de l'École polytechnique, corps des Ponts, il est l'auteur d'avancées fondamentales dans le fonctionnement des machines synchrones (MS) et leur couplage au réseau. Le diagramme de Blondel, méthode d'étude de l'induit d'une MS à pôles saillants avec les vecteurs de Fresnel, est toujours couramment utilisé.

Dans le cas d'un **circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire**, si, à la fois :

- on peut définir un flux variable $\varphi(t)$ à travers le circuit,
- le circuit coupe des lignes de champ magnétique dans son déplacement,

alors la f.é.m. induite dans le circuit est $e = -\frac{d\varphi}{dt}$.

Dans le cas d'un **circuit fixe dans un champ magnétique variable**, la f.é.m. induite

dans le circuit est $e = -\frac{d\varphi}{dt}$.

SYNTHÈSE

SAVOIRS

- établir l'équation différentielle du circuit
- loi de Faraday
- algébrisation de la loi de Faraday

SAVOIR-FAIRE

- évaluer un flux magnétique
- décrire, mettre en œuvre et interpréter des expériences illustrant les lois de Lenz et de Faraday

MOTS-CLÉS

- flux magnétique
- f.é.m. induite
- loi de Lenz
- loi de Faraday