

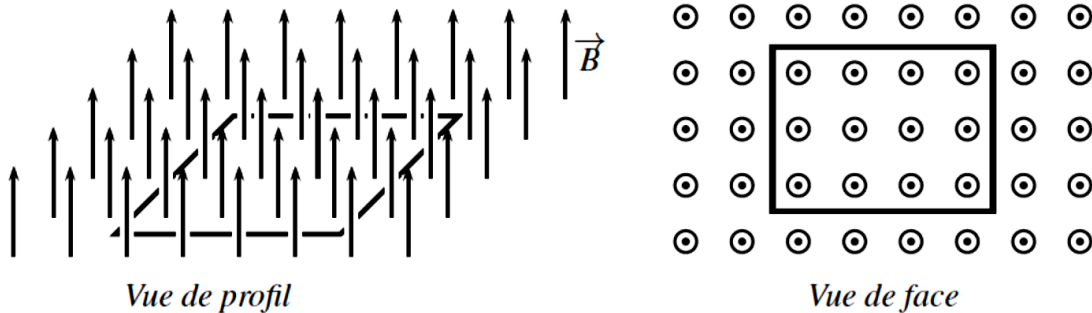
CHAPITRE 3 : Lois de l'induction

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

1. Flux magnétique

1.1. Définition du flux magnétique

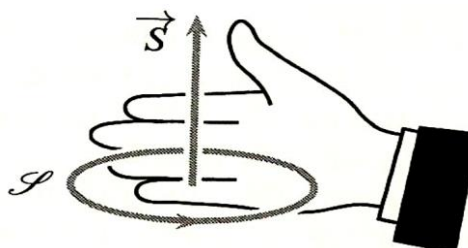
On considère un champ magnétique \vec{B} uniforme et une spire rectangulaire, de surface S , située dans un plan orthogonal au champ. La "quantité" de champ magnétique qui traverse la surface S est appelée flux du champ magnétique ou flux magnétique et a pour valeur $B.S$.



Dans le cas général, le plan de la surface S n'est pas orthogonal à \vec{B} . Le flux magnétique noté φ à travers la surface S s'écrit alors $\varphi = \vec{B} \cdot \vec{S}$ (3-1) où \vec{S} est une surface orientée. φ peut être positif ou négatif ; c'est une grandeur algébrique dont le signe dépend du choix d'orientation de la surface.

1.1. 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 suivante



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.

1.2. Unité de flux magnétique

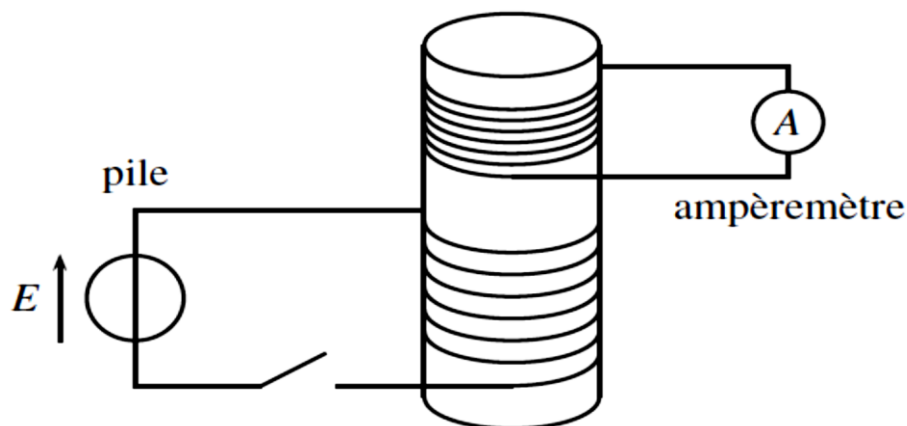
L'unité de flux champ magnétique est le weber, de symbole Wb.

$$\text{Wb} = \text{T} \cdot \text{m}^2 = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$$

2. Expérience induction électromagnétique

2.1. Expérience de Faraday

En 1831, Michael Faraday (1791-1867, physicien anglais), se demande 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 :



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 utilisera 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

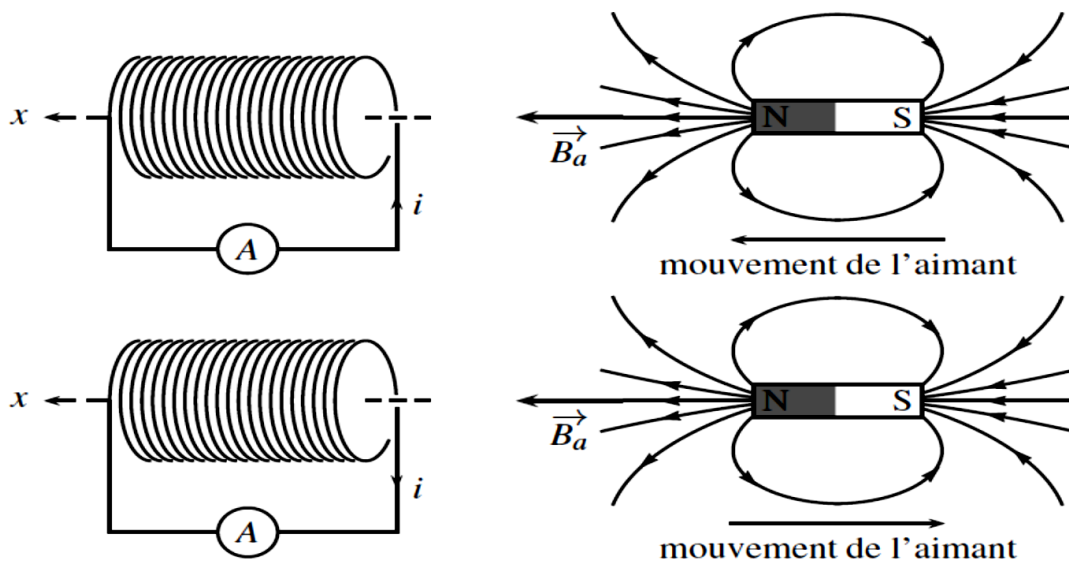
premier circuit qui était à l'origine du courant électrique détecté dans le second. Il publia ses résultats en 1831.

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. Expérience avec un aimant et une bobine

On effectue l'expérience suivante : une bobine est reliée à un ampèremètre. On approche un aimant, son pôle nord avançant vers la bobine. On constate l'apparition d'un courant dans la bobine dans le sens indiqué sur la figure ; 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.



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. Phénomène d'induction électromagnétique

Les expériences décrites ci-dessus 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 le 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 stationnaire.

Le phénomène d'induction se produit donc 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 modération de Lenz

Le champ magnétique de l'aimant sort par le pôle nord (figure précédente). 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 \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 $-\vec{u}_x$, 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 \vec{u}_x diminue. Le courant induit crée, d'après la règle de la main droite, un champ magnétique porté par \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 Lenz ou loi de modération de Lenz (Heinrich Friedrich Emil Lenz, 1804-1865, physicien balte d'origine allemande).

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

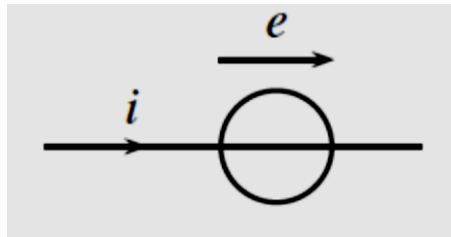
3. Loi de Faraday

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 le générateur fictif, dit générateur induit dont la force électromotrice (f.é.m.) e est donnée par la formule $e = -\frac{d\varphi}{dt}$ (3-2). e est appelée force électromotrice (f.é.m.) induite.

3.2. Convention d'algébrisation

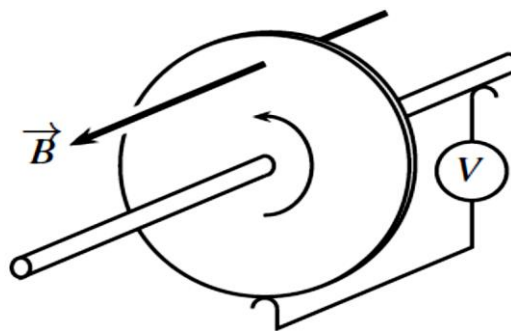
Si on veut étudier un circuit électrique qui est le siège d'un phénomène d'induction électromagnétique, il faut ajouter dans le schéma du circuit le générateur induit. La flèche du générateur induit doit être mise dans le sens positif conventionnel pour le courant i dans le circuit. La f.é.m. induite e est comptée positive dans le sens conventionnel positif du courant.



Cette représentation correspond à une convention générateur.

3.3. Exceptions à la règle de flux

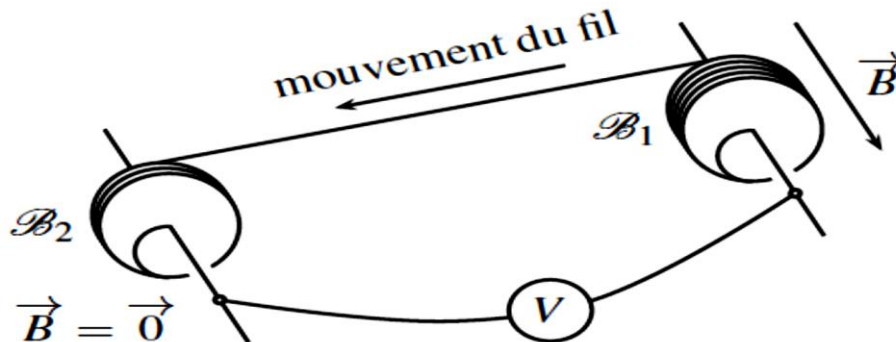
On considère tout d'abord le cas d'un circuit dans lequel une f.é.m. est induite, mais sans variation de flux : la roue de Barlow.



Un disque de surface S tourne autour de son axe. L'ensemble est un 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.

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 Blondel. Deux bobines \mathcal{B}_1 et \mathcal{B}_2 tournent autour de leurs axes, qui restent parallèles. On déroule une bobine afin de 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 \mathcal{B}_1 est placée dans une région où règne un champ magnétique uniforme et stationnaire, parallèle à son axe. La bobine \mathcal{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 \mathcal{B}_1 , alors n_1 démunie au cours du temps lorsqu'on la déroule. Le flux du champ magnétique \vec{B} à travers les n_1 spires de la bobine \mathcal{B}_1 , chacune de surface S , vaut $n_1 BS$. 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

On admet la formulation générale de la loi de Faraday.

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 :

$$e = -\frac{d\varphi}{dt} \quad (3-2)$$

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

$$e = -\frac{d\varphi}{dt} \quad (3-2)$$