

Programme officiel

Notions et contenus	Capacités exigibles
Flux d'un champ magnétique à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté.	Évaluer le flux d'un champ magnétique uniforme à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté plan.
Loi de Faraday Courant induit par le déplacement relatif d'une boucle conductrice par rapport à un aimant ou un circuit inducteur. Sens du courant induit.	Décrire et interpréter des expériences illustrant les lois de Lenz et de Faraday.
Loi de modération de Lenz.	Utiliser la loi de Lenz pour prédire ou interpréter les phénomènes physiques observés.
Force électromotrice induite, loi de Faraday.	Utiliser la loi de Faraday en précisant les conventions d'algébrisation.

Plan

1 Quelques observations expérimentales

- 1.1 Expérience historique de Faraday
- 1.2 Expériences de « cours » : bobines et aimant
- 1.3 Interprétation : phénomène d'induction électromagnétique

2 Loi de Faraday

- 2.1 Flux magnétique
- 2.2 Force électromotrice induite
- 2.3 Convention de signes
- 2.4 Contre-exemples à la loi de Faraday

3 Loi de modération de Lenz

Vérification des connaissances

	Connaissances
☐	Flux d'un champ magnétique à travers un circuit fermé (surface s'appuyant sur un contour fermé orienté).
☐	Loi de Faraday : force électromotrice induite (expression mathématique et sens dans le circuit équivalent associé), sens du courant induit.
☐	Loi de modération de Lenz : énoncé.

	Capacités
☐	Calculer le flux d'un champ magnétique uniforme ou non uniforme à travers un circuit fermé (surface s'appuyant sur un contour fermé orienté).
☐	Prévoir ou interpréter un phénomène d'induction en utilisant la loi de Lenz.
☐	Réaliser un schéma électrique équivalent du circuit en accord avec le calcul de la force électromotrice par la loi de Faraday.

Introduction

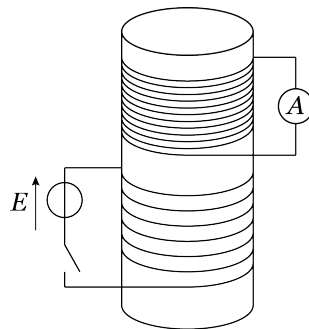
Dans le chapitre précédent, on a vu qu'un courant électrique crée un champ magnétique. Ici, on va voir comment un champ magnétique, peut réciproquement, créer un courant électrique. C'est le phénomène d'induction électromagnétique. On peut citer d'innombrables applications : l'alternateur d'une centrale, les transformateurs, le chauffage par induction, des capteurs, les bases de recharge des nouveaux smartphones, etc.

1 Quelques observations expérimentales

1.1 Expérience historique de Faraday

En 1831, Faraday, 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 ci-contre.

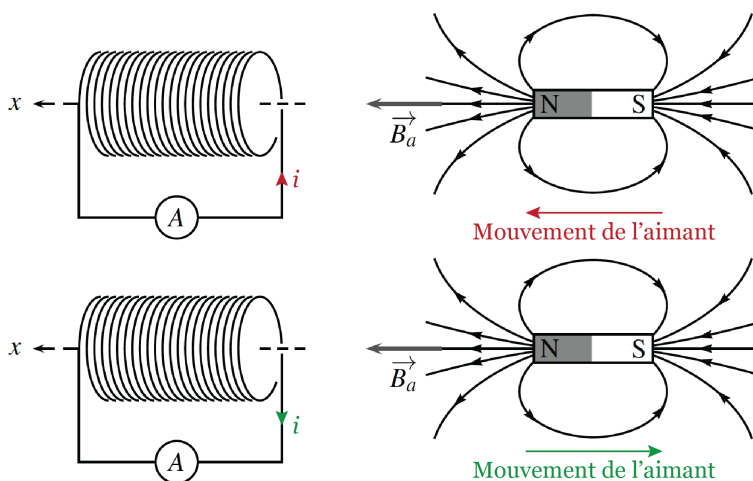
Deux enroulements de fils sur un cylindre en bois étaient reliés l'un à une pile par l'intermédiaire d'un interrupteur, l'autre à un ampèremètre. Dans un premier temps, Faraday espérait mesurer un courant avec l'ampèremètre en alimentant le premier enroulement pour créer un champ magnétique. Quand l'interrupteur 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.

1.2 Expériences de « cours » : bobines et aimant

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 ci-dessous ; 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.

→ Voir les vidéos 9 et 10 : apparition d'un courant électrique dans la bobine dû au mouvement de l'aimant.

1.3 Interprétation : 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 dans le circuit.

La condition pour voir un **phénomène d'induction** dans un circuit est que le *champ magnétique « traversant le circuit » varie dans le temps*. Cette variation peut avoir deux causes :

- le circuit est plongé dans un champ magnétique variable
- le circuit se déplace dans un champ magnétique

Dans l'expérience historique de Faraday, on est dans le premier cas au moment où l'on ouvre ou ferme l'interrupteur. Ce cas est observé aussi dans les autres expériences, quand on déplace l'aimant ou la bobine qui est alimentée par un générateur. Le deuxième cas est observé dans les expériences précédentes quand on déplace la bobine qui est reliée à l'ampèremètre.

2 Loi de Faraday

L'équation régissant le phénomène d'induction est la loi de Faraday. Cette loi fait intervenir une grandeur liée au circuit et au champ magnétique dans lequel il est placé : le **flux magnétique**.

2.1 Flux magnétique

Considérons une spire plane de forme quelconque placée dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$. On suppose qu'un sens positif conventionnel a été choisi pour le courant circulant dans la spire.

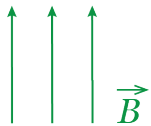
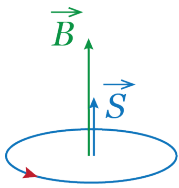


Le **flux magnétique** traversant la spire est

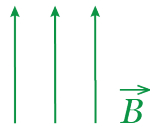
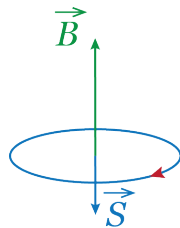
$$\varphi = \vec{B} \cdot \vec{S}$$

où $\vec{S}$ est le vecteur surface de la spire.

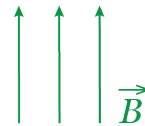
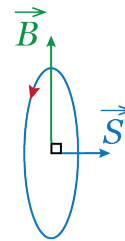
Le flux magnétique est une grandeur algébrique dont le signe dépend du choix d'orientation de la spire et du sens du champ magnétique. Il est ainsi positif si $\vec{B}$ et $\vec{S}$ sont de même sens. Quelques exemples sont traités ci-dessous :



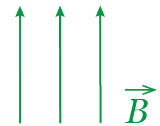
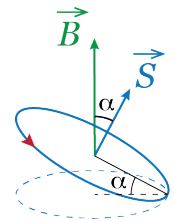
Le champ magnétique traverse orthogonalement la surface de la spire, les vecteurs $\vec{B}$ et $\vec{S}$ sont colinéaires. On a donc $\varphi = BS$.



Le sens conventionnel de circulation du courant est inversé : les vecteurs $\vec{B}$ et $\vec{S}$ sont donc orthogonaux mais de sens opposé. On a donc $\varphi = -BS$.



La spire est maintenant parallèle au champ magnétique : les vecteurs $\vec{B}$ et $\vec{S}$ sont donc orthogonaux : $\varphi = 0$, le champ magnétique ne traverse pas la spire.



Les vecteurs $\vec{B}$ et $\vec{S}$ font un angle α . Le flux est donc $\varphi = BS \cos \alpha$: la surface offerte au champ magnétique est seulement la projection de S sur un plan perpendiculaire à $\vec{B}$ qui vaut alors $S \cos \alpha$.

Flux d'un champ magnétique uniforme à travers une bobine On peut considérer une bobine comme une succession de spires jointives. Dans ce cas, le flux magnétique à travers une bobine est égal à la somme des flux magnétiques à travers toutes ses spires.

Unité du flux magnétique L'unité de flux champ magnétique est le weber, de symbole Wb. Dans le chapitre sur le champ magnétique, on a montré que le tesla, unité du champ magnétique, est identique à des $\text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$. Ainsi :

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

→ Voir les vidéos 11 à 16 : variations du flux magnétique à travers un circuit mobile. Le champ magnétique est créé par le gros aimant : éloignement du circuit, rapprochement, rotation et déformation du circuit.

2.2 Force électromotrice induite

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 :



Loi de Faraday

Le courant induit dans le circuit est égal à celui que produit un générateur fictif dont la force électromotrice e , appelée **force électromotrice induite** est donnée par la formule

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

où φ est le flux magnétique à travers le circuit.

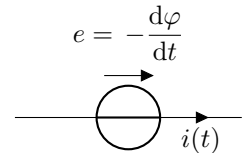
Il existe donc deux types de situations dans lesquelles on peut observer un phénomène d'induction :

- ① un conducteur est plongé dans un champ magnétique variable : c'est **l'induction de Neumann**
- ② un conducteur se déplace dans une zone où règne un champ magnétique : c'est **l'induction de Lorentz**

2.3 Convention de signes

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 en indiquant que la flèche du générateur induit doit être mise dans le sens positif conventionnel pour le courant i dans le circuit.

La force électromotrice (f.é.m) induite e est comptée positive dans le sens conventionnel positif du courant :

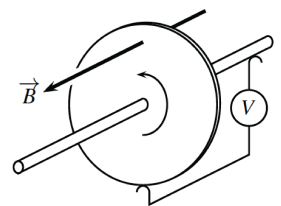


2.4 Contre-exemples à la loi de Faraday

La loi de Faraday, sous la forme de l'équation $e = -\frac{d\varphi}{dt}$, n'est pas toujours vérifiée dans le cas d'un conducteur en mouvement dans une zone où règne un champ magnétique.

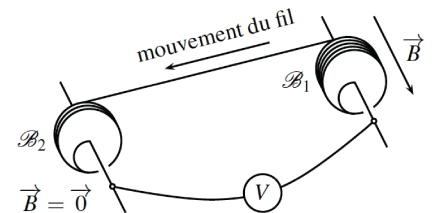
2.4.1 Roue de Barlow

On considère 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.



2.4.2 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 Blondel. Deux bobines, $\mathcal{B}_1$ et $\mathcal{B}_2$, 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 $\mathcal{B}_1$ 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 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 $\mathcal{B}_1$, 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 $\vec{B}$ ».

On retiendra la condition suffisante de validité de la loi de Faraday :

Dans le cas d'un conducteur en mouvement dans un champ magnétique, la loi de Faraday est valable si :

- le conducteur constitue un circuit à travers lequel le flux magnétique est défini à chaque instant
- le conducteur coupe des lignes de champ magnétique dans son mouvement.

On verra un exemple au cours du chapitre suivant : le rail de Laplace.

Dans le premier exemple, le conducteur en mouvement ne délimite pas un circuit filiforme. Dans le second exemple, le circuit électrique ne coupe aucune ligne de champ magnétique : lors de son mouvement, il passe « entre les lignes de champs $\vec{B}$ ».

3 Loi de modération de Lenz

On a vu que le champ magnétique d'un aimant sort par le pôle nord. Il est le 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 et 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 Lenz :



Loi de Lenz

Les phénomènes d'induction s'opposent, par leurs effets, aux causes qui leur ont donné naissance.