

Lois de l'induction

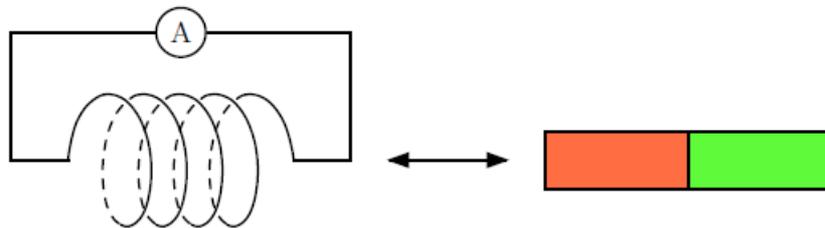
Un courant électrique produit un champ magnétique. Le processus inverse est-il également possible ? Joseph Henry (en 1830) et Michael Faraday (en 1831) réalisèrent indépendamment des expériences qui montrèrent qu'il est possible de produire des effets électriques à partir de champs magnétiques. Ce phénomène, appelé induction électromagnétique, fut une des majeures découvertes en vue de la production de l'électricité utilisée dans la vie de tous les jours.

1. Variation de flux

1.1. Mise en évidence expérimentale

Expérience 1 : aimant droit et bobine (bobine 1000 spires + vieil ampère-mètre)

Une bobine reliée à un ampèremètre et un aimant droit sont en mouvement relatif.



Observations :

- Lorsque la bobine et l'aimant sont en mouvement relatif, un courant électrique d'intensité I circule dans la bobine.
- Le sens du courant électrique dans la bobine change si :
 - ☞ Le sens du déplacement est inversé.
 - ☞ Les pôles de l'aimant sont permutés.
- L'intensité I du courant dépend de la vitesse relative de la bobine et de l'aimant.

Interprétation :

La variation du champ magnétique au niveau de la bobine crée un courant induit dans la bobine. Ce phénomène est l'induction électromagnétique.

Le courant induit crée un champ magnétique induit \vec{B}_{ind} qui se superpose au champ créé par l'aimant.

En mesurant le sens de l'intensité, on peut faire le schéma ci-dessous :

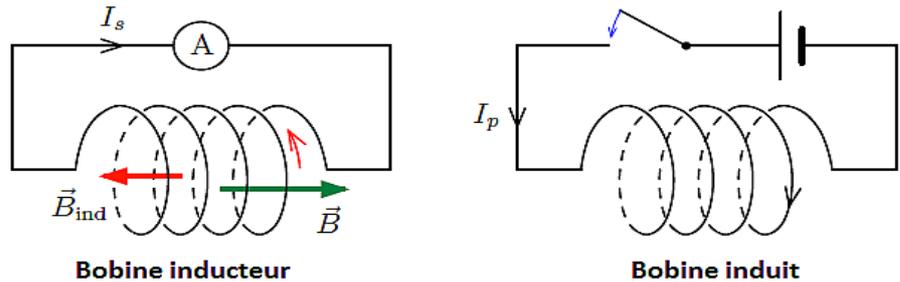


Sens de \vec{B}_{ind} , première approche:

\vec{B}_{ind} s'oppose aux variations de \vec{B}

Expérience 2 : bobine inducteur et bobine induit

Considérons deux bobines immobiles disposées en vis-à-vis. La bobine à droite, appelée bobine primaire ou inducteur, est reliée à une pile et à un interrupteur. La bobine à gauche, appelée bobine secondaire ou induit, est reliée à un ampèremètre.



Observations :

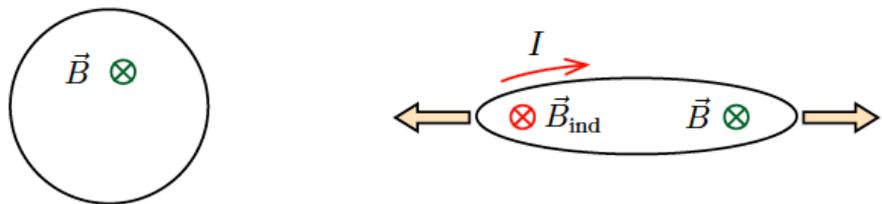
- À la fermeture de l'interrupteur, un bref courant induit I_s apparaît dans la bobine secondaire.
- Tant que le courant I_p reste constant, il ne se passe rien.
- Si on ouvre l'interrupteur, l'ampèremètre détecte un bref courant induit dans le sens opposé.

Interprétation :

Le courant I_p crée un champ magnétique \vec{B} au niveau de la bobine secondaire. La variation de ce champ magnétique lors de la fermeture et puis lors de l'ouverture de l'interrupteur crée un courant induit dans la bobine secondaire.

Expérience 3 : déformation d'une boucle de courant

Une boucle circulaire de fil conducteur flexible est placée dans un champ magnétique uniforme de sorte que son plan soit perpendiculaire au vecteur champ. On déforme la boucle en tirant subitement sur deux points diamétralement opposés.



Observations :

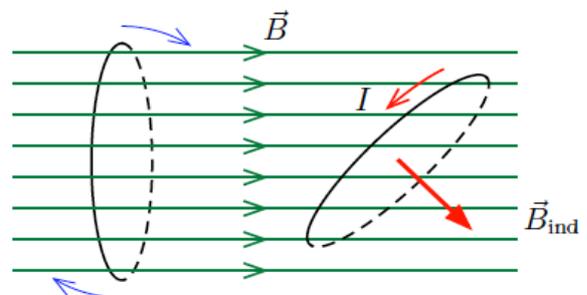
- Lors de la déformation, un courant induit apparaît dans le fil conducteur.

Interprétation :

- Le champ magnétique au niveau de la boucle est constant. La variation de l'aire de la surface délimitée par la boucle crée un courant induit.

Expérience 4 : Rotation d'une boucle de fil conducteur

Une boucle circulaire de fil conducteur est placée dans un champ magnétique uniforme (le champ magnétique terrestre) de sorte que son plan soit perpendiculaire au vecteur champ. On fait tourner le plan de la boucle par rapport à la direction du champ.



Observation :

- lors de la rotation, un courant induit apparaît dans le fil conducteur.

Interprétation :

- Le champ magnétique et l'aire de la boucle sont constants. La variation de l'orientation de la boucle par rapport à la direction du champ crée un courant induit à l'origine d'un champ B induit.

Conclusions relatives aux 3 expériences :

Si une boucle de fil conducteur est placée dans un champ magnétique. Un courant induit apparaît dans cette boucle si au moins une des grandeurs suivantes varie :

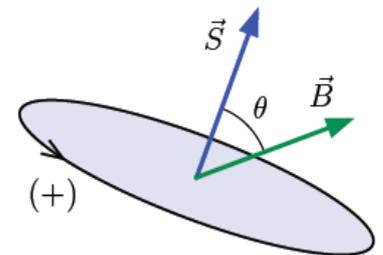
- **Le champ magnétique au niveau de la boucle.**
- **L'aire de la surface délimitée par la boucle.**
- **L'orientation du plan de la boucle par rapport à la direction du champ.**

Pour pouvoir expliquer ces résultats et formuler les lois de l'induction électromagnétique, nous allons définir une grandeur qui fait intervenir ces trois grandeurs : le flux.

1.2. Flux du champ à travers un circuit

a) Définition

Soit une surface S plane orientée. Le flux du champ magnétique \vec{B} uniforme, à travers cette , est défini par le produit scalaire : $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \times S \cos \theta$ où θ est l'angle entre \vec{B} et \vec{S}



L'unité de flux magnétique est le weber (Wb) : $1 \text{ Wb} = 1 \text{ Tm}^2$.

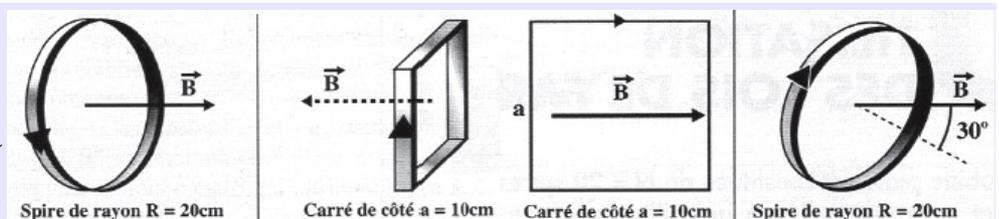
Remarques :

- Le vecteur \vec{S} qu'on associe à la surface est perpendiculaire au plan de la surface, de valeur égale à l'aire de la surface et avec un sens déterminé par la règle de la main droite:
 - pouce \rightarrow sens du vecteur \vec{S}
 - index \rightarrow s'appliquant sur le contour dans le sens positif.
- Le flux magnétique est proportionnel au nombre de lignes de champ traversant la surface.
- Pour calculer le flux magnétique à travers une bobine de N spires, on multiplie par N le flux traversant une seule spire.
- Si le champ magnétique n'est pas uniforme sur toute la surface on découpe la surface en éléments de surface, on calcule le flux élémentaire puis son somme sur toute la surface $\Phi = \iint_S d\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$.

b) Exemples de calculs (exemple de cours 1)

Énoncé

Calculer le flux dans chacun des cas représentés sur les figures. On supposera le champ \vec{B} uniforme et de valeur égale à 10 mT .



Solution

2. Lois de l'induction

2.1. Origine du courant et du champ induits

Un courant induit apparaît dans une boucle de fil conducteur placée dans un champ magnétique si le flux magnétique à travers cette boucle varie.

Ce courant induit est à l'origine d'un champ magnétique induit.

2.2. Loi de Lenz : sens du courant induit

a) Énoncé général:

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

b) Conséquence : détermination du courant induit

Le sens du courant induit est tel que le flux magnétique du champ magnétique qu'il crée s'oppose à la variation de flux magnétique qui le produit.

Considérons à nouveau l'expérience 1. Le physicien russe Heinrich Friedrich Lenz remarqua que le champ magnétique induit \vec{B}_{ind} , créé par le courant induit, s'oppose à la variation du flux magnétique Φ du champ \vec{B} à travers la boucle :

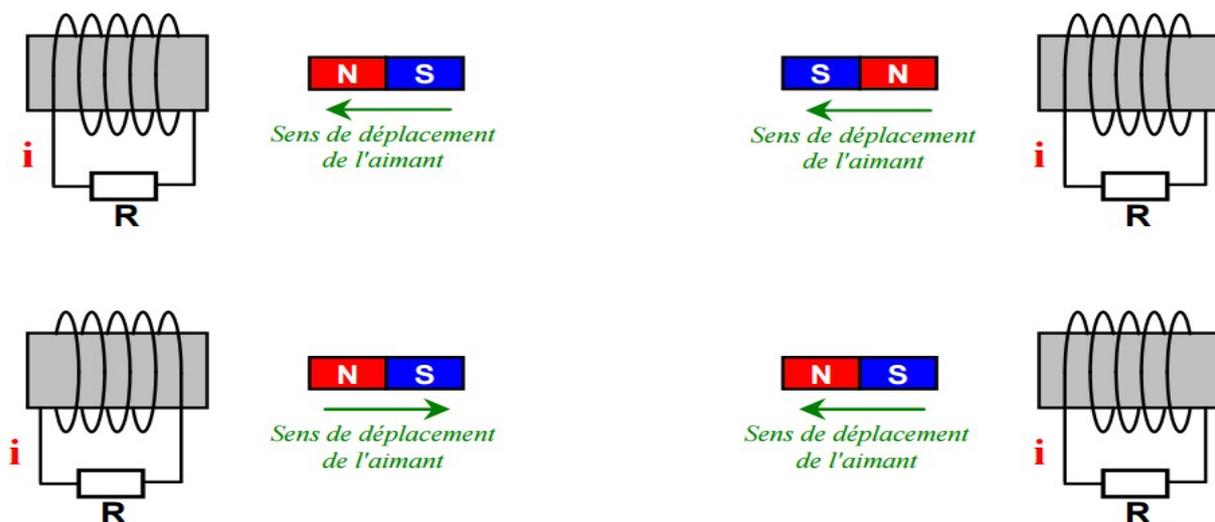
- si Φ augmente, \vec{B}_{ind} et \vec{B} ont des sens contraires ;
- si Φ diminue, \vec{B}_{ind} et \vec{B} ont le même sens.

c) Exemple : sens du courant dans une bobine (exemple de cours 2)

Énoncé

Dans les 4 cas ci-dessous, indiquer :

- Le sens réel du courant induit i qui traverse la résistance R ;
- La direction et le sens du champ magnétique induit.



Solution

2.3. Loi de Faraday

En 1831 Faraday déduisit des expériences d'induction que le courant induit dans le circuit provenait d'un générateur fictif dit générateur induit .

a) Enoncé

La force électromotrice e induite dans une boucle de fil conducteur traversée par le flux magnétique Φ est donnée par :

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

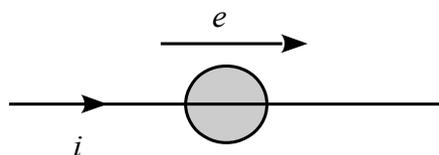
Remarque :

Si la boucle est remplacée par une bobine de N spires, la f.é.m. induite est : $e = -N \frac{d\Phi}{dt}$ où Φ est le flux magnétique à travers une spire.

Conventions d'alébrisation :

Si 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.

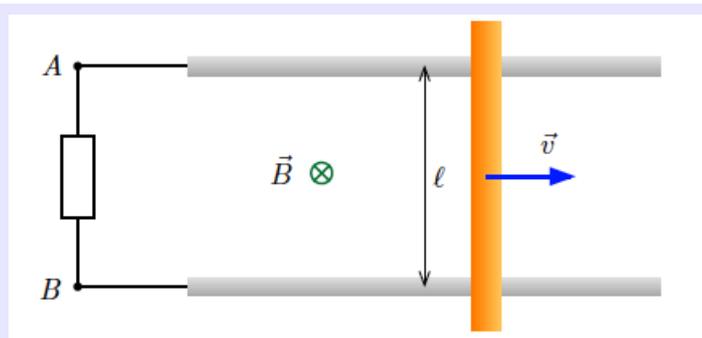
La flèche du générateur induit doit être mise dans le sens positif conventionnel pour le courant i dans le circuit.



b) Exemple : rail de Laplace (*exemple de cours 3*)

Énoncé

Une tige en cuivre se déplace à la vitesse constante \vec{v} sur des rails placés dans un champ magnétique uniforme \vec{B} . Les rails, distants de l , sont reliés à une résistance. On néglige la résistance de la tige de cuivre.



- 1) Expliquer pourquoi un courant induit apparaît dans le circuit. Déterminer le sens réel du courant induit.
- 2) Appliquer la loi de Faraday pour calculer la tension U_{AB} aux bornes de la résistance en fonction de B , l et v .
- 3) Calculer la tension U_{AB} si $B = 200$ mT, $v = 1,5$ m/s et $l = 10$ cm.

Solution

3. Application : Principe de l'alternateur

3.1. Définition

Un *alternateur* est une machine rotative qui convertit l'énergie mécanique fournie au rotor en énergie électrique. Plus de 95% de l'énergie électrique est produite par des alternateurs.

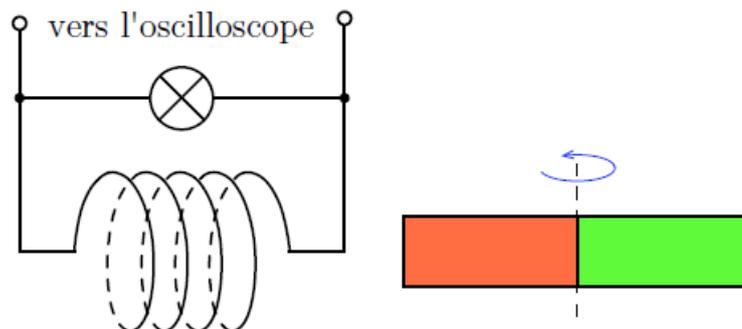
Deux grands principes permettent de fabriquer un alternateur :

- Soit B est fixe et le circuit mis en rotation par un moyen extérieur
- Soit le champ est tournant et le circuit fixe.

Nous allons illustrer ces 2 possibilités.

3.2. Expérience : circuit fixe dans un champ tournant

Un aimant entraîné par un moteur à vitesse réglable tourne devant une bobine reliée à une lampe. Pour visualiser la tension aux bornes de la bobine on y branche un oscilloscope en parallèle.



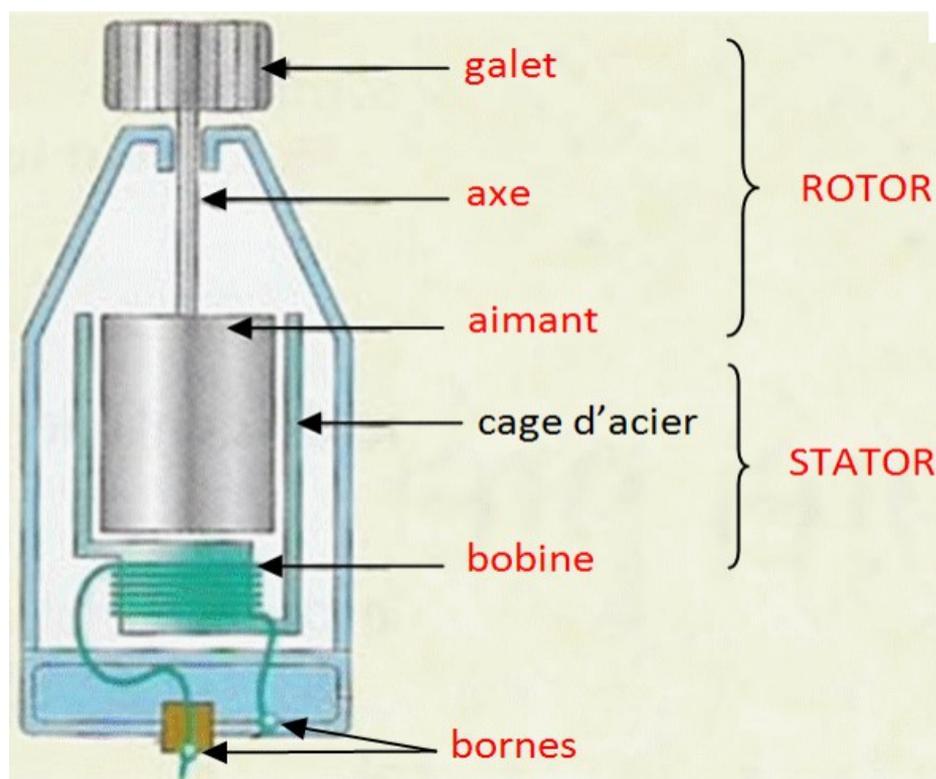
Observations :

Il apparaît une tension aux bornes de la bobine. On constate que cette tension varie de façon sinusoïdale en fonction du temps. C'est une tension *alternative*.

Interprétation :

Le flux à travers la bobine varie lorsque l'aimant tourne. Cette variation crée un courant induit dans le circuit et une tension aux bornes de la bobine. Plus la rapidité de la variation du flux est grande, plus la f.é.m. est importante.

Cette expérience illustre le principe de la dynamo



3.3. Circuit mobile dans B fixe (exemple de cours 4)

Un cadre rectangulaire de côtés a et b , comportant N spires est disposé verticalement. Il est plongé dans un champ magnétique uniforme et horizontal $\vec{B} = B\vec{u}_x$. A l'instant initial $t = 0$, \vec{B} est orthogonal au cadre situé dans le plan (O, y, z) . La figure ci-contre représente le dispositif à $t = 0$.

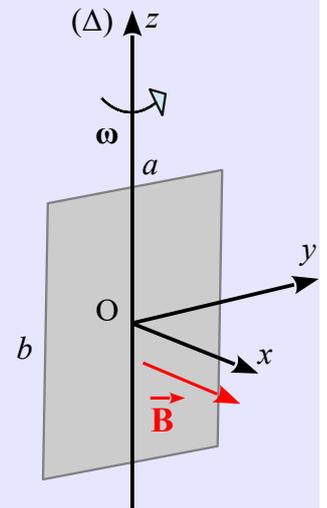
Grâce à un moteur, on fait alors tourner le cadre à la vitesse angulaire constante ω autour de l'axe (Δ) confondu avec l'axe Oz et passant par les milieux des petits côtés.

Le circuit a une résistance totale R . Le point O est au centre du cadre.

1) Exprimer l'intensité, du courant induit dans le cadre. En déduire la puissance moyenne consommée par le circuit.

2) Déterminer le moment du couple moteur nécessaire pour faire tourner le cadre, puis la puissance moyenne nécessaire à cette rotation. Conclure.

Données numériques : $a = 3 \text{ cm}$; $b = 5 \text{ cm}$; $N = 20$ spires, fréquence de rotation du cadre $f = 50 \text{ Hz}$; $B = 0,4 \text{ T}$; $R = 1 \Omega$.



Solution :

