

## XXIII-1 Lois de l'induction

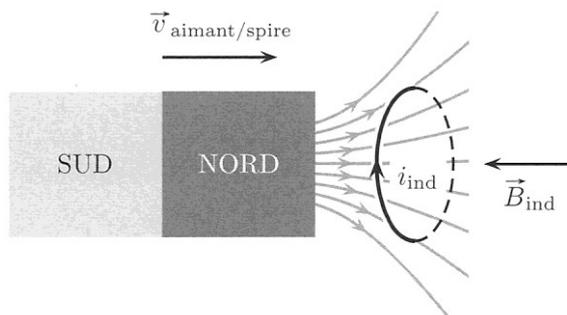
Le phénomène d'induction électromagnétique est le nom donné à l'apparition de courants, dits induits, dans un circuit soumis à un champ magnétique dans certaines conditions. L'induction est technologiquement très importante car elle constitue le principe de base de tous les dispositifs électrotechniques (générateurs électriques de type dynamo, transformateurs électriques).

### I - Aspect expérimental de l'induction

#### I-1) Expérience de Faraday

En 1831, le Britannique Michael Faraday a constaté qu'en approchant un aimant d'un circuit fermé (spire de cuivre), un courant électrique prend naissance dans la spire alors qu'il n'y a pas de générateur.

*Induction dans une spire. Lors de l'approche de l'aimant, un courant électrique est induit dans la spire dans le sens indiqué par la flèche  $i_{ind}$ . Ce courant crée un champ magnétique induit  $B_{ind}$ .*



## I-2) Caractéristiques

Les caractéristiques de ce courant, appelé courant induit, sont les suivantes.

- L'intensité du courant induit croît avec la vitesse d'approche de l'aimant.
- L'intensité du courant induit croît si la surface de la spire croît.
- Le sens du courant induit est tel qu'il génère un champ magnétique  $\vec{B}_{ind}$  tendant à s'opposer à la croissance du champ magnétique dû au rapprochement de l'aimant.

Les mêmes résultats sont obtenus si l'aimant est fixe et si la spire est approchée de l'aimant. Seul le déplacement relatif de l'aimant par rapport à la spire compte.

## II - Lois de l'induction

### II-1) Flux magnétique

On cherche à établir des règles permettant de prévoir le sens et l'intensité du courant induit dans tous les cas. On s'appuie pour cela sur les résultats de l'expérience décrite à la figure.

Plus la spire est grande, plus il y a de lignes de champ de l'aimant qui la traversent. Lorsque l'aimant s'approche de la spire, de plus en plus de lignes de champ magnétique de l'aimant traversent la spire (ce qui revient à dire que l'intensité du champ magnétique augmente dans la région de la spire).

En vue de formaliser les lois de l'induction, on introduit le flux magnétique, grandeur mathématique permettant un « comptage » des lignes de champ passant à travers la spire.

**Soit un circuit électrique orienté (arbitrairement) par le sens conventionnel du courant (flèche de  $i$ ). Soit  $\vec{S}$  le vecteur surface du circuit défini par le sens de  $i$  et la règle de la main droite. Si le circuit baigne dans un champ magnétique  $\vec{B}$  uniforme, le flux magnétique  $\phi$  à travers le circuit est défini par le produit scalaire :**

$$\phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \vec{B} \cdot \vec{S} \text{ si } \vec{B} \text{ est uniforme}$$

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

L'apparition d'un courant électrique induit montre que tout se passe comme si le circuit contenait un générateur. La difficulté consiste à exprimer la force électromotrice de ce générateur. En relation avec les points expérimentaux observés et à la suite de mesures précises, Faraday a établi la loi qui porte son nom.

## II-2) Loi de Faraday de l'induction (1831)

### a) Définition

Soit un circuit électrique filiforme orienté arbitrairement par le sens conventionnel de  $i$ . Soit  $\vec{S}$  le vecteur surface de ce circuit, orienté par  $i$  et la règle de la main droite. Le circuit est le siège d'une force électromotrice induite  $e$ , orientée conventionnellement dans le même sens que  $i$  (convention générateur) et telle que :

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

L'unité SI de  $e$  est le volt (V).

### b) Utilisation de la loi de Faraday

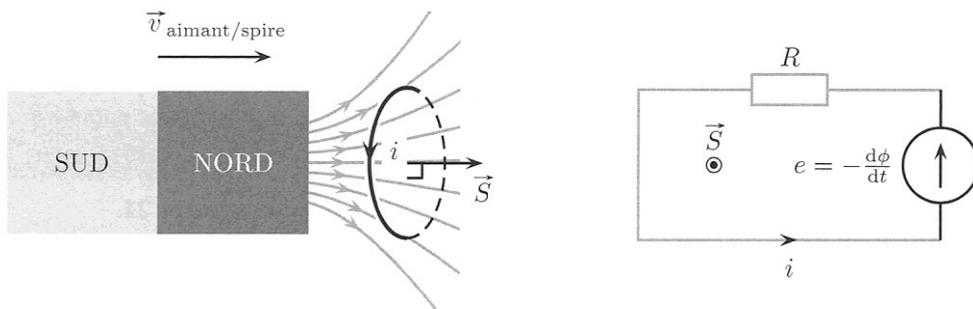
La loi de Faraday nécessite de mettre en place des orientations et de les respecter durant toute la résolution d'un problème d'induction.

- 1- Orienter (arbitrairement) le circuit en choisissant un sens conventionnel pour le courant (flèche de  $i$ ).
- 2- En déduire le vecteur surface  $\vec{S}$  du circuit par la règle de la main droite.
- 3- Calculer le flux magnétique à travers le circuit :  $\phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$  (expression valide seulement si  $\vec{B}$  est uniforme à l'échelle du circuit).
- 4- En déduire la force électromotrice induite :  $e = -\frac{d\phi}{dt}$
- 5- Dessiner le schéma électrique équivalent au circuit. Il s'agit du schéma de départ auquel on ajoute un générateur électrique de force électromotrice  $e$  orientée dans le même sens que  $i$  (convention générateur).
- 6- Le schéma équivalent permet d'écrire une ou plusieurs équations électriques pour calculer l'intensité du courant induit.

### c) Application

On peut appliquer cette méthode à l'expérience de la figure précédente pour vérifier que la loi proposée par Faraday est en accord avec les phénomènes observés. On choisit un sens d'orientation pour la spire (choix du sens de la flèche de  $i$ ) et on en déduit le vecteur surface  $\vec{S}$  de la spire (voir figure à gauche). Malheureusement, le flux magnétique n'est pas calculable explicitement ici, car le champ magnétique créé par l'aimant n'est pas uniforme à l'échelle de la spire. Cependant, ce champ est orienté

dans le même sens que  $\vec{S}$ , donc «  $\phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$  » (expression non rigoureuse ici) est positif. Ce flux croît lorsque l'aimant s'approche, car l'intensité de  $\vec{B}$  augmente au niveau de la spire. Par conséquent,  $\frac{d\phi}{dt}$  est positif. La loi de Faraday donne la fem induite  $e = -\frac{d\phi}{dt}$ , qui est ici négative. Sur le schéma électrique équivalent,  $e$  doit être orientée en convention générateur (dans le même sens que  $i$ , voir figure à droite). En notant  $R$  la résistance électrique de la spire, l'équation électrique du circuit équivalent s'écrit  $e = Ri$ , ce qui montre que  $i$  est négatif. Ainsi, le sens du courant induit réel est opposé à l'orientation de  $i$  qui avait été arbitrairement choisie. Ce résultat est en accord avec le sens du courant induit observé expérimentalement (représenté sur la figure page 1).



*Induction dans une spire fixe dont on approche un aimant. À gauche, schéma de la situation avec orientation arbitraire de  $i$  qui impose celle du vecteur surface  $\vec{S}$ . À droite, schéma électrique équivalent : la fem induite doit être orientée comme  $i$ .*

Cette étude est bien en accord avec les trois faits observés expérimentalement.

- 1- Plus l'aimant est approché rapidement, plus le flux magnétique  $\phi$  croît vite, donc plus  $\frac{d\phi}{dt}$  est grand. La valeur absolue de la force électromotrice induite est donc grande, ce qui fait croître l'intensité du courant induit.

- 2- Plus la surface de la spire augmente, plus le flux  $\phi$  est grand et plus  $\frac{d\phi}{dt}$  l'est, ce qui fait croître  $|i|$ .
- 3- Le sens du courant induit est en accord avec la loi de modération de Lenz, formulée par le physicien russe Heinrich Lenz en 1833.

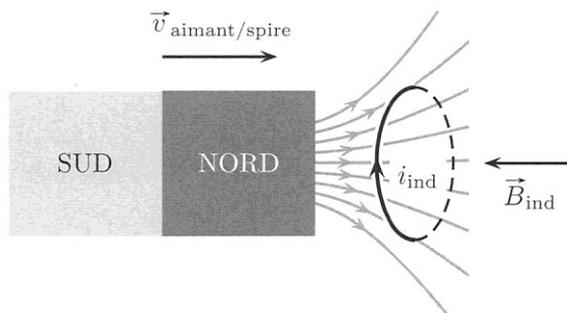
### II-3) Loi de modération de Lenz

#### a) Définition

**Le sens du courant induit est tel que, par ses effets, il tend à s'opposer aux causes qui lui ont donné naissance.**

#### b) Applications

Cette loi est générale et nécessite, pour être appliquée correctement, de bien identifier les causes du phénomène d'induction. Deux visions sont possibles ici.



- 1- La cause de la naissance du courant induit est le déplacement de l'aimant. Le courant induit est dans un sens tel que la spire acquiert un moment magnétique orienté de la droite vers la gauche. Le côté nord de la bobine est donc à gauche de la bobine : il fait face au pôle nord et tend à repousser celui-ci (l'opposition à la cause est ici une répulsion mécanique via des forces magnétiques).

2- La cause de la naissance du courant est l'augmentation de l'intensité du champ magnétique  $B$  créé par l'aimant au niveau de la spire (du fait du rapprochement de l'aimant), ce champ étant dirigé de la gauche vers la droite. Le courant induit dans la spire tend à créer un champ magnétique (champ induit) dirigé vers la gauche. Il tend donc à s'opposer à la croissance du champ magnétique de l'aimant :

$$\vec{B}_{tot} = \vec{B}_{aimant} + \vec{B}_{ind} \text{ croît moins vite que } \vec{B}_{aimant} \text{ seul}$$

c) Remarques :

- À la fin de la résolution d'un problème d'induction, il faut toujours tester l'accord des prévisions avec la loi de modération de Lenz. Cela permet de détecter d'éventuelles erreurs de signes.
- La loi de modération de Lenz est implicitement contenue dans le signe « moins » de la loi de Faraday  $e = - \frac{d\phi}{dt}$  : le signe de la fem induite  $e$  est toujours opposé à celui de la croissance algébrique  $d\phi$  du flux magnétique.