

Chapitre 31 : Fondements de l'induction

Lorsqu'un champ magnétique est mis en mouvement dans une bobine, celle-ci est parcourue par un courant électrique, en atteste l'expérience d'introduction¹.

Si l'aimant est immobile par rapport à la bobine, rien en se passe. Le courant n'apparaît que lorsque l'aimant a un mouvement par rapport à la bobine. Nous allons, dans ce chapitre, essayer de comprendre ce phénomène.

I - Lois de l'induction

A Flux du champ magnétique

① Contour, surface et orientation

Considérons un contour **fermé** \mathcal{C} .

- ▷ Un tel contour est dit **orienté** lorsqu'on lui donne un sens
- ▷ Un contour fermé délimite une **surface**.
- ▷ On appelle **normale** à la surface un vecteur unitaire orthogonal à cette surface.

Remarques :

- Le sens du vecteur dépend de l'orientation de la surface. Il est donné par la règle de la main droite (ou du tire-bouchon)
- Dans nos exercices, le contour sera usuellement orienté par le sens du courant i le parcourant.

② Flux du champ magnétique

DÉFINITION

Flux magnétique : Soit \vec{B} un champ magnétique **uniforme** et S une surface plane appuyée sur un contour orienté (on note sa normale \vec{n}).

On définit Φ le flux du champ magnétique à travers la surface ainsi :

Remarque : On pose parfois \vec{S} le vecteur surface ($\vec{S} = S\vec{n}$) tel que : $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$.

Le flux du champ magnétique donne la quantité de champ magnétique qui passe à travers la surface. On peut dire qu'il correspond au "nombre" de lignes de champ qui traversent la surface.

1. <https://www.youtube.com/watch?v=jfB2zERZYsY>

3 Retour sur l'expérience d'introduction

Dès que l'aimant est en mouvement par rapport à la bobine, un courant apparaît dans la bobine. En réalité, on peut observer sur cette vidéo², qu'un courant apparaît même si la bobine est en mouvement et que l'aimant est immobile. Cela dit, cela semble logique dans la mesure où le mouvement est relatif au référentiel dans lequel on l'étudie.

On peut associer à ce mouvement une variation du **flux magnétique** et en déduire que cette variation est à l'origine du courant présents dans la bobine.

On dit alors que la variation du flux magnétique à travers la bobine **induit** un courant la traversant : c'est le **phénomène d'induction**. On parle alors de **courants induits**.

B Étude qualitative : Loi de Lenz

1 Énoncé de la loi

Le courant induit dans la bobine, va à son tour, produire un champ magnétique comme nous l'avons vu au chapitre 32.

Expérimentalement, on remarque que ce champ magnétique suit une loi.

LOI DE LENZ

Remarque :

- Cette loi ne se limite pas à l'induction et se retrouve dans plusieurs domaines de la physique sous le nom de **loi de modération**.
- Dès qu'une étude qualitative est demandée dans l'énoncé, on utilise cette loi. Notamment, elle est utilisée pour trouver le sens du courant induit.

2 Retour sur l'expérience introductive

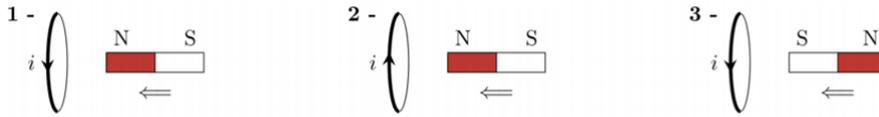
Notons \vec{B}_0 le champ magnétique externe (dans notre cas produit par un aimant) et \vec{B}_i le champ magnétique produit par le courant induit i dans la bobine.

L'apparition de \vec{B}_i est due à l'induction de i par la variation du flux de \vec{B}_0 au travers de la bobine. On en déduit par la loi de Lenz que \vec{B}_i s'oppose à la variation de \vec{B}_0 au travers de la bobine :

2. <https://www.youtube.com/watch?v=7vp7ptSvK0>

APPLICATION DIRECTE N°1

Dans chacun des circuits ci-dessous, l'aimant droit est déplacé dans le sens indiqué par la double flèche. Indiquer le signe du courant i apparaissant dans la spire pendant le déplacement.



C Étude quantitative : Loi de Faraday

① Énoncé de la loi

En 1831, Michael Faraday déduit de ses expériences une loi qui permet de relier formellement l'aspect magnétique du phénomène à l'aspect électrique.

LOI DE FARADAY

Soit un circuit **orienté** et soit \vec{S} le vecteur surface associé (orienté par i et la règle de la main droite). Soit Φ le flux du champ magnétique à travers ce circuit.

On introduit e la **force électromotrice** induite par les phénomènes d'induction. Elle est définie en convention **générateur**, soit dans le même sens que le courant i .

La loi de Faraday donne la relation suivante :

Remarque : Quelle que soit l'origine de la variation du flux (mouvement de l'aimant, mouvement de la spire, déformation de la spire) cette loi restera valable dans les exercices abordés.

MÉTHODE : DÉTERMINER UN COURANT INDUIT

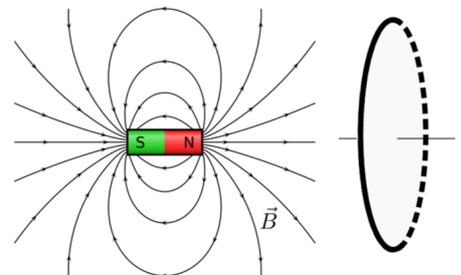
Remarque : L'orientation initiale peut être choisie arbitrairement ou bien grâce à la loi de Lenz.

2 Retour sur l'expérience introductive

APPLICATION DIRECTE N°2

On considère une spire circulaire fermée de rayon r et de résistance électrique totale R . On approche un aimant de la spire (schéma ci-contre).

- 1/ Prédire le sens du courant induit en utilisant la loi de modération de Lenz.
- 2/ On indique qu'approcher l'aimant résulte l'expression suivante pour le champ magnétique au niveau de la spire (et on le supposera approximativement uniforme sur la spire) : $\vec{B} = B_0 \frac{t}{T} \vec{e}_z$



- (a) (étape 1 : orientation) Faire un choix d'orientation du contour du circuit, tracer la normale \vec{n} et le sens du courant i .
- (b) (étape 2 : exprimer Φ) Donner l'expression du flux Φ du champ magnétique de l'aimant à travers la spire, en fonction de B_0 , t , T et r .
- (c) (étapes 3 et 4 : schéma électrique, loi de Faraday, loi des mailles) Faire un schéma électrique équivalent de la spire.
Donner l'expression de la fem induite dans le circuit de la spire par le mouvement de l'aimant (loi de Faraday) (on ne tient pas compte du phénomène d'autoinduction, qui sera vu dans la partie II).
En déduire l'expression du courant induit en fonction de R , r , B_0 et T .
Le signe du courant obtenu est-il en accord avec le résultat de la question 1 ?

II - Induction propre ou auto-induction

Dans la première partie, nous avons étudié l'influence du flux d'un **champ magnétique extérieur** sur une spire ou une bobine.

Considérons maintenant une spire parcourue par un courant en l'absence de champ magnétique extérieur. Nous avons vu lors du premier chapitre d'induction que ce courant est à l'origine d'un champ magnétique. C'est le flux de ce champ magnétique que nous allons étudier dans cette partie.

On notera i le courant circulant dans la spire et \vec{B}_{propre} le champ magnétique produit par celle-ci.

A Flux propre et inductance propre

DÉFINITION

Flux propre : Flux du champ créé par une spire à travers cette même spire :

$$\Phi_{\text{propre}} = \vec{B} \cdot \vec{S}$$

avec $\vec{S} = S\vec{n}$ le vecteur surface de la spire.

Remarque : En qualifiant le circuit (spire ici) considéré de circuit 1, on note parfois ce flux propre $\Phi_{\text{propre}} = \Phi_{1 \rightarrow 1}$ en considérant qu'il s'agit du flux du circuit 1 au travers du circuit 1.

À RETENIR

Le flux propre d'une spire parcourue par un courant i est proportionnel à ce courant :

Remarques :

- Cette relation de proportionnalité sert de **définition** pour l'inductance que nous avons vue en électrocinétique !
- La valeur de l'inductance dépend de la géométrie du circuit.

APPLICATION DIRECTE N°2

On considère le composant électronique "bobine", que l'on modélise comme un enroulement de N spires sur une longueur ℓ d'axe z , avec un rayon a .

Lorsque cette bobine est parcourue par un courant i , il se crée un champ magnétique \vec{B} dont on donne l'expression $\vec{B} = \mu_0 n i \vec{e}_z$ (ceci est valable dans la bobine, pas trop près des bords, et sera démontré l'an prochain), avec $n = \frac{N}{\ell}$ le nombre de spires par unité de longueur.

- 1/ Dessiner l'allure des lignes de champ dans la bobine.
- 2/ On considère une spire de la bobine. Donner son orientation sur un schéma (rappel : c'est le courant qui donne cette orientation).
Puis donner l'expression du flux $\Phi_{\text{une spire}}$ de \vec{B} à travers cette spire.
- 3/ En déduire l'expression du flux propre de \vec{B} à travers toute la bobine.
- 4/ Rappeler la définition de l'inductance L d'un circuit, puis donner son expression pour la bobine en fonction de μ_0 , n , et du volume $V = \pi a^2 \ell$ de la bobine.
- 5/ A.N. pour $\ell = 50$ cm, $a = 3,0$ cm, $N = 1000$ spires (et on donne $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H.m⁻¹).

Ordres de grandeur :

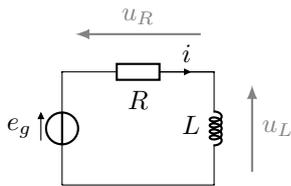
- Inductance d'une bobine utilisée en TP : $L_{\text{bobine}} =$
- Inductance d'une spire de rayon 1 m et dont le fil a un rayon de 1 mm (circuit électrique) : $L_{\text{spire}} =$

B Auto-induction

Plaçons la bobine de l'AD n°2 dans un circuit alimenté par un générateur de tension e_g en série avec une résistance R . Vérifions l'équivalence des traitements en électricité et en induction.

1 Point de vue de la théorie de l'électrocinétique

Considérons le circuit électronique suivant :



La loi des mailles donne : $e_g = u_R + u_L$

D'après la loi d'Ohm et la loi de comportement de la bobine, on obtient :

$$e_g = Ri + L \frac{di}{dt}$$

2 Point de vue de la théorie de l'induction

Plaçons-nous dans le cadre de la théorie de l'induction et vérifions que nous obtenons les mêmes relations pour le circuit en question.

Remarques : On retrouve la même équation et on retrouve même $u_L = -e_{\text{ind}} = L \frac{di}{dt}$.

3 Point général

La méthode utilisant la théorie de l'induction est plus lourde mais elle permet plusieurs choses :

- Connaissant les caractéristiques de la bobine, on peut déterminer l'expression de L .
- En réalité, tout circuit a une inductance propre qui lui est associée, on ne peut traiter de tels cas que du point de vue de l'induction.
- Lorsque deux bobines sont en interaction, il est nécessaire de recourir à l'utilisation des lois de l'induction (cf III).

C Approche énergétique

Considérons le circuit étudié précédemment, la loi électrique suivie par le courant i est la suivante :

D Retour sur la loi de Lenz

Supposons que $e_g = E$ constant pendant un long moment. Puis, à $t = 0$, on coupe cette alimentation ($e_g = 0$ subitement).

Remarque : L'énergie stockée dans le champ magnétique est consommée pour créer ce champ induit.

III - Couplage entre deux circuits : Induction mutuelle

En pratique, un autre type de dispositif peut être très intéressant à étudier. Considérons deux circuits électriques notés 1 et 2 disposés l'un en face de l'autre.

A Principe du couplage

DÉFINITION

Coefficient de mutuelle inductance : On appelle coefficient de mutuelle inductance M , le coefficient de couplage inductif entre deux bobines tel que :

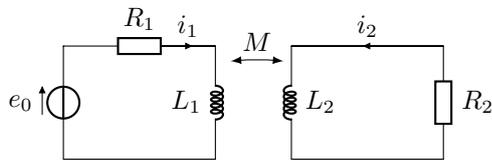
Remarque : À l'inverse de L , M peut être positif ou négatif en fonction du choix d'orientation des deux circuits.

À RETENIR

Soient deux circuits électriques, 1 et 2 :

B Établissement des équations électriques

On dispose du système ci-dessous constitué des deux circuits en interaction par induction mutuelle :



C Approche énergétique