

L' Induction

L'induction est un phénomène physique de production d'électricité dans un circuit conducteur au moyen d'un champ magnétique.

Nous avons vu au 1^{er} semestre qu'un courant électrique circulant dans un conducteur produisait automatiquement un champ magnétique. Nous allons voir dans ce chapitre que le réciproque est vraie mais sous certaines conditions :

- soit en déplaçant un champ magnétique stationnaire au voisinage d'un circuit électrique fixe ;
- soit en déplaçant (ou déformant) un circuit électrique au voisinage d'un champ magnétique stationnaire fixe.

Pour la petite histoire, c'est Michael Faraday, scientifique britannique, qui a réussi en 1831 à montrer expérimentalement qu'il était possible de produire un courant électrique dans un conducteur en le soumettant à un flux magnétique variable. Et c'est, en 1834, qu'Heinrich Lenz, scientifique allemand qui travaillait en parallèle sur le même phénomène, a formulé sa loi : la loi de Lenz qui stipule que le courant induit par la variation de flux magnétique dans le conducteur, tend à s'opposer à ce qui lui a donné naissance.

La combinaison de ces deux travaux de recherche a donné la loi de Faraday ou de Lenz-Faraday que nous allons décrire dans ce chapitre.

I. Approche expérimentale du phénomène d'induction électromagnétique.

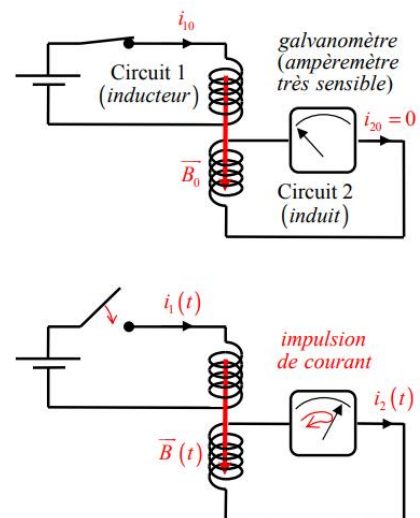
Expérience 1 :

Dans sa première expérience, Faraday dispose deux bobines en position coaxiale, de manière à ce que le champ magnétique créé par la première bobine s'exerce au cœur de la seconde.

Il observe alors le phénomène suivant :

- Lorsque le courant est établi dans le circuit 1, le champ magnétique permanent ainsi créé ne produit pas de courant dans le circuit 2. Faraday s'en assure en utilisant un détecteur de courant de très grande sensibilité.
- En revanche, au moment de la fermeture du circuit 1, dans la phase transitoire où le champ magnétique est en train de s'établir, il apparaît une impulsion de courant dans le circuit 2.

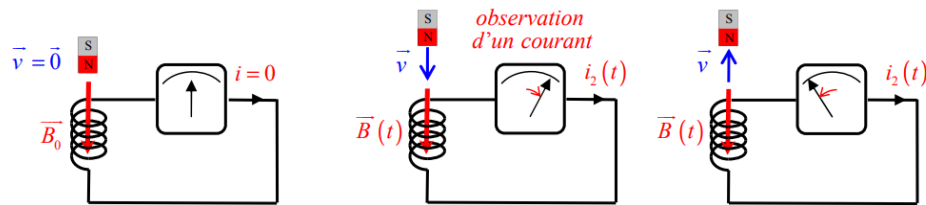
Faraday conclut que le phénomène électrique n'est pas dû au champ magnétique lui-même, mais à sa variation. Il montre également qu'une inversion du sens du courant inducteur (et donc aussi du sens du champ d'induction magnétique) provoque une inversion du sens de l'impulsion de courant dans le circuit 2.



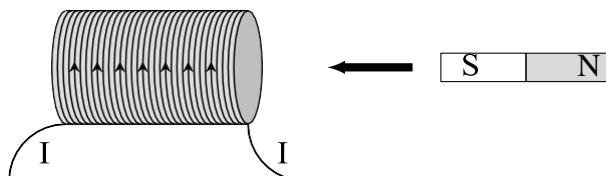
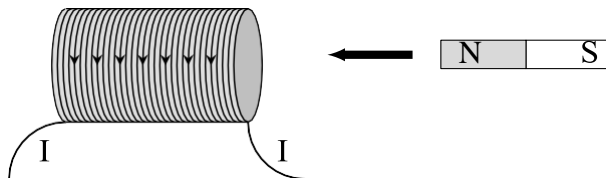
Expérience 2 :

Pour sa deuxième expérience, Faraday utilisa cette fois un aimant permanent en guise d'inducteur (placé à proximité d'une boucle constituée d'un fil conducteur). Il observa les phénomènes suivants :

- Un aimant immobile n'induit aucun courant dans le circuit électrique.
- Lorsqu'on déplace l'aimant, on voit apparaître un courant dont le signe varie selon qu'on approche ou qu'on éloigne l'aimant. De plus, ce courant est d'autant plus important que le déplacement est rapide.

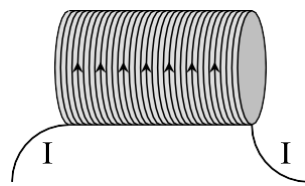
Conclusion expérimentale :

Le phénomène d'induction est donc l'apparition d'un courant induit dans un circuit grâce à un champ magnétique et à la variation du flux de ce champ à travers la surface du circuit traversée par le champ magnétique.

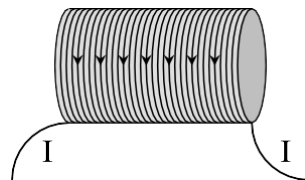
Expériences**Observations**

Si on approche une face nord d'un aimant droit au voisinage de la bobine, c'est à dire un champ magnétique dirigé vers la gauche, alors un courant induit apparaît dans celle-ci dans un sens qui lui fait créer un champ magnétique vers la droite (on peut raisonner en terme de faces magnétiques : on approche une face nord, le circuit oppose alors une face nord).

Si on approche une face sud, c'est à dire un champ magnétique dirigé vers la droite, un courant induit apparaît, son sens crée un champ magnétique dirigé vers la gauche.



Si on éloigne une face nord, c'est à dire un champ magnétique dirigé vers la gauche, un courant induit apparaît, son sens crée un champ magnétique dirigé vers la gauche.



Si on éloigne une face sud, c'est à dire un champ magnétique dirigé vers la droite, un courant induit apparaît, son sens crée un champ magnétique dirigé vers la droite.

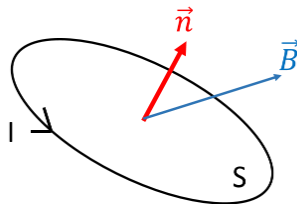
<https://www.physagreg.fr/electromagnetisme-18-notions-induction.php>

Ces expériences peuvent être effectuées de la même manière en considérant l'aimant fixe et en déplaçant la bobine (on change de référentiel). Les résultats seront similaires.

II. Loi de Lenz-Faraday ou Loi de Faraday

1. Flux d'un champ magnétique

Nous avons déjà vu la notion de flux en électrostatique (voir théorème de Gauss). Soit une surface S contenue dans un contour fini, orientée selon sa normale \vec{n} (grâce à la règle de la main droite).



Soit un champ \vec{B} traversant cette surface, le flux du champ magnétique s'écrit :

$$\phi_B = \iint_S \vec{B} \cdot \vec{n} dS \quad \text{avec } \phi_B \text{ qui s'exprime en } Tm^2 \text{ ou en Weber (Wb)}$$

2. Notion de Force électromotrice

Une force électromotrice e (*fem*) n'est pas une force, elle est homogène à une tension, elle s'exprime donc en *Volt* (*V*). Dans un circuit électrique, pour mettre en mouvement des charges, il est nécessaire de fournir du travail, et la force électromotrice correspond au travail que fournit un générateur au circuit par unité de charge. Ce concept de force électromotrice avait été initialement émis par Alessandro Volta, scientifique Italien, lors de la fabrication de la 1^{ère} pile électrique en 1799.

Cette fem est donc responsable de la mise en mouvement des charges électriques et permet ainsi d'obtenir un courant électrique.

Si \vec{F} est la force qui s'exerce sur la charge q pour la mettre en mouvement dans le circuit C , alors la fem e s'écrit :

$$e = \frac{1}{q} \oint_C \vec{F} \cdot d\vec{l} = \oint_C \vec{E}_m \cdot d\vec{l}$$

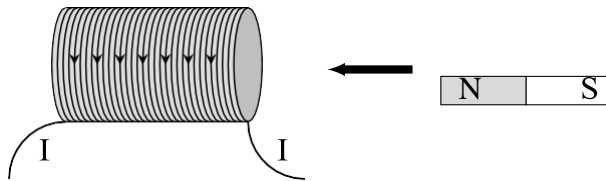
C'est bien égal au travail fourni par unité de charge ou encore la circulation du champ électrique induit, appelé champ électromoteur \vec{E}_m ("champ qui fait bouger les électrons").

Remarque : Pour un générateur, la f.e.m. est la tension à vide aux bornes de celui-ci, c'est à dire quand il n'est pas connecté à un circuit.

3. Loi de modération de Lenz

C'est, en 1834, qu'Heinrich Lenz, scientifique allemand qui travaillait en parallèle de Faraday sur le même phénomène d'induction, a formulé sa loi : la loi de Lenz qui stipule que le courant induit par la variation de flux magnétique dans le conducteur, tend à s'opposer à ce qui lui a donné naissance.

Les phénomènes d'induction s'opposent par leur(s) effet(s) aux causes qui leur ont donné naissance



Dans l'expérience ci-dessus, on impose à la bobine un champ magnétique dirigé vers la gauche, celle-ci réagit alors en créant un champ magnétique opposé (vers la droite) via le courant induit qui s'établit dans ses spires.

4. Expression de la loi de Lenz-Faraday ou Loi de Faraday

Cette loi exprime le fait que le courant induit apparaît dans le circuit électrique par l'intermédiaire d'une force électromotrice induite, cette dernière provenant de la variation temporelle du flux magnétique à travers la surface orientée contenue dans le circuit électrique fermé.

En tenant compte de la loi de Lenz, l'expression de la fem est la suivante :

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

L'orientation du circuit, qui permet de définir la surface orientée S , donne son orientation à la fem et ainsi le sens du courant induit dans le circuit. Le signe - qui apparaît dans cette loi de Faraday montre qu'il y a opposition entre la fem induite et la variation de flux, ceci est la

traduction de la loi de Lenz : les effets s'opposent aux causes.

Remarque : On pourra utiliser une représentation électrique du circuit siège de ce phénomène d'induction : on y fera apparaître la fem (générateur), le courant induit, ainsi que l'impédance électrique du circuit. Il suffira ensuite d'utiliser la loi d'Ohm pour déterminer l'expression du courant induit.

Les causes de la variation du flux peuvent être de différentes natures. On peut faire varier la surface S (en déformant le circuit) ou bien le champ magnétique \vec{B} (en approchant ou éloignant la source du champ, ou bien en changeant sa direction, en changeant sa valeur).

On peut en particulier citer deux exemples simples d'induction : celle de Neumann et celle de Lorentz.

Induction de Neumann : circuit fixe indéformable et champ magnétique variable

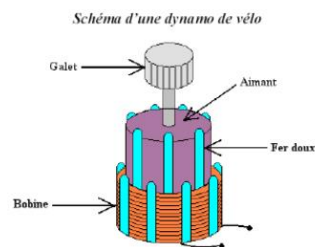
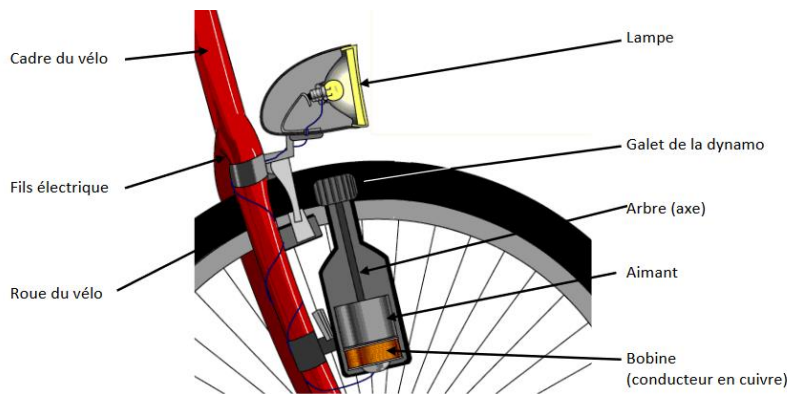
Un circuit fixe et indéformable est le siège de phénomènes d'induction à partir du moment où le champ magnétique varie au cours du temps dans l'espace où se trouve ce circuit. Si le champ magnétique a pour seule cause le courant qui circule dans le circuit lui-même, on parle de phénomène d'auto-induction. Dans le cas plus général où le champ magnétique variable est créé par d'autres courants ou aimants situés dans le voisinage du circuit, on parle de phénomènes d'induction de Neumann.

Induction de Lorentz : circuit mobile et/ou déformable et champ magnétique constant.

Une autre cause possible de variation du flux magnétique est le déplacement ou la déformation des circuits dans un champ magnétique indépendant du temps. Pour des vitesses de déplacement des éléments de circuit très petites par rapport à la vitesse de la lumière, les champs magnétiques induits sont très petits par rapport aux champs inducteurs et l'on peut donc négliger l'auto-induction. Ces conditions particulières définissent les phénomènes d'induction de Lorentz non relativiste.

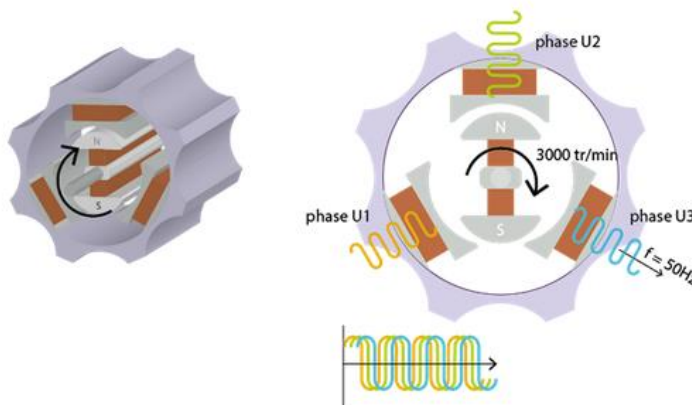
Quelques exemples d'applications dans la vie courante du phénomène d'induction :

a. C'est pour cela que la dynamo d'un vélo n'alimente les lumières que quand le vélo roule, et pas à l'arrêt. Plus vous pédalerez vite, plus vous ferez tourner vite le champ magnétique, plus l'intensité lumineuse semblera continue et plus elle sera vive. C'est un courant alternatif induit qui est créé, et sa fréquence est proportionnelle à la vitesse de rotation de l'aimant dans la bobine et donc à la vitesse de pédalage.



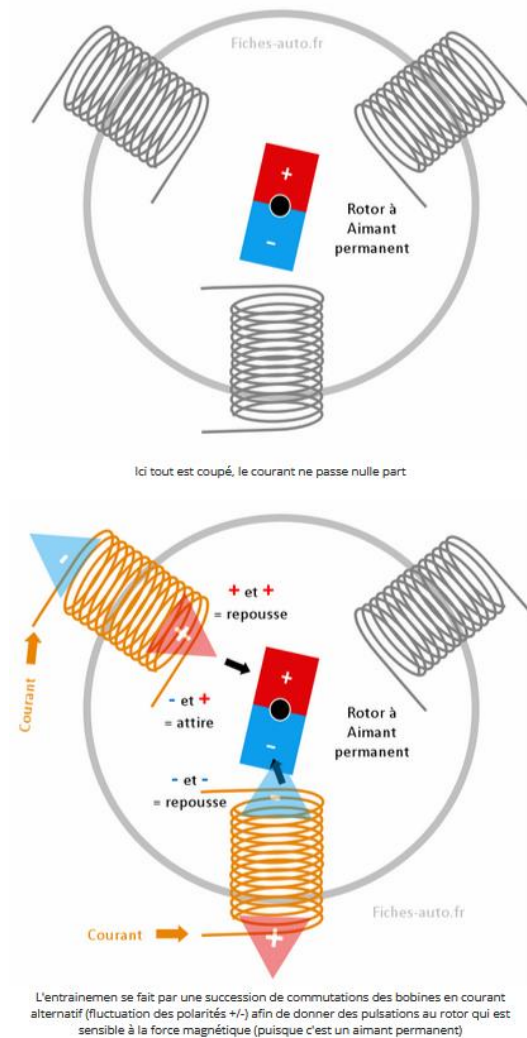
http://technoschool.free.fr/files/doc_ress_dynamo.1383.pdf

- b. L'induction est principalement utilisée dans les alternateurs et moteurs électromagnétiques.
- Ci-dessous, le schéma simplifié d'un alternateur triphasé. Il est constitué d'un rotor, sur lequel sont disposés les aimants, et d'un stator formé de 3 bobines dans lesquelles vont circuler les courants induits. Chaque bobine étant une phase du réseau triphasé. Ce type d'alternateur est utilisé dans l'éolien.



<https://energieplus-lesite.be/techniques/cogeneration9/alternateur/>

- Pour les moteurs électromagnétiques c'est l'inverse : les bobines sont fixes (stator) et c'est la partie centrale avec les aimants qui tourne (rotor). L'action des 3 champs magnétiques sur les aimants centraux génère des forces magnétiques qui font tourner le rotor. C'est la rotation centrale qui va entraîner la rotation de l'arbre dans les voitures électriques comme dans la pompe du filtre d'un aquarium.



<https://www.fiches-auto.fr/articles-auto/voiture-electrique/s-2262-fonctionnement-du-moteur-synchrone-a-aimants-permanents.php>

c. Freinage par Courants de Foucault

- Dans le freinage par courants de Foucault, un conducteur se déplace dans un champ magnétique, donc du point de vue du conducteur, le champ magnétique varie. Il apparaît alors des courants induits dans le conducteur appelés courants de Foucault. D'après la loi de Lenz-Faraday, l'apparition de ces courants doit s'opposer aux causes qui leur ont donné naissance, donc au mouvement : il y a donc freinage. Celui-ci s'effectue par l'intermédiaire des forces de Laplace qui s'exerce sur le conducteur puisqu'il est parcouru par des courants et est plongé dans un champ magnétique.
- Dans le cas des plaques à induction, des bobines alimentées en courant alternatif génèrent un champ magnétique oscillant sur le fond ferromagnétique des casseroles. Puisque toute variation temporelle du flux magnétique traversant un matériau ferromagnétique y induit un courant de Foucault, il s'établit un courant dans le fond de la casserole. Cette mise en mouvement des électrons par la force de Lorentz entraîne une dissipation d'énergie par effet Joule, et donc fait chauffer la casserole.

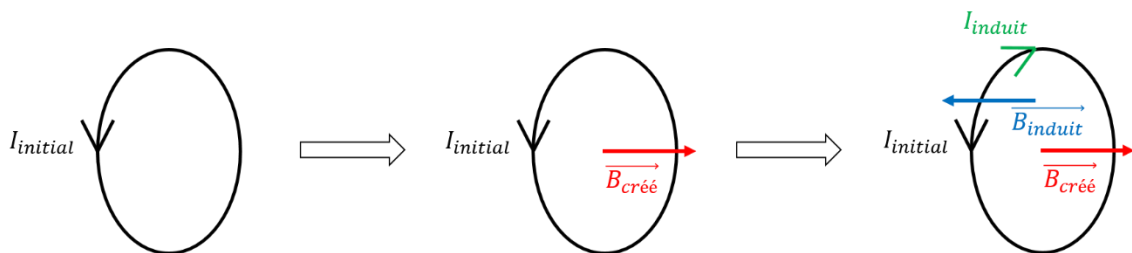
- La recharge par induction des batteries (brosse à dents, téléphones...) fonctionne sur le même principe la bobine située sur le socle de recharge induit des courants de Foucault, cette fois-ci dans une seconde bobine située proche de la batterie de l'appareil à charger. Ces courants induits peuvent ainsi alimenter la batterie et la recharger.

III. Auto-induction et inductance d'une bobine

1. Phénomène d'auto-induction

Un courant qui passe dans une spire crée un champ magnétique. Si ce courant varie, le champ magnétique varie également. Ainsi, on est en présence d'un champ magnétique variable à l'intérieur d'un conducteur, la bobine elle-même !

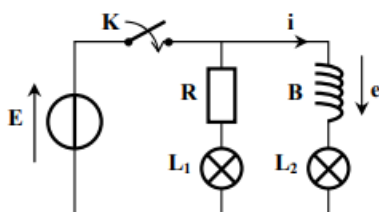
Il y a donc auto-induction : la spire parcourue par le courant crée un champ magnétique qui crée un courant induit dans cette même spire. D'après la loi de Lenz, ce courant induit s'oppose à la cause qui lui a donné naissance : ce courant induit est dans le sens inverse du courant initial qui s'établit dans la spire.



N'oublions pas que le courant induit n'existe que lorsqu'il y a variation du champ magnétique. En régime permanent, ce courant n'existe plus mais en régime variable il va "freiner" l'établissement du courant dans le circuit.

Pour le dipôle RL, l'établissement du courant dans ce circuit comportant une bobine n'est pas instantané.

Dans le circuit ci-dessous, à la fermeture de l'interrupteur, la lampe L_2 s'allume en retard par rapport à la lampe L_1 . Ceci est dû au fait que l'augmentation de l'intensité dans la bobine engendre une augmentation du champ magnétique. Il y a donc un phénomène d'induction et une fem négative apparaît aux bornes de la bobine qui va s'opposer à la variation de courant (loi de Lenz). La bobine s'oppose donc à la variation du champ magnétique qu'elle crée elle-même ; d'où le terme auto-induction.



Voir la vidéo : <http://phymain.unisciel.fr/retard-a-lallumage-2/>

2. Flux propre d'une bobine

Il est donc possible de calculer le flux propre du champ magnétique créé par la bobine à travers la surface de la bobine elle-même. Celui-ci dépend des caractéristiques de la bobine et du champ magnétique (donc de l'intensité du courant).

Finalement, on peut écrire : $\Phi = Ki(t)$ où K est une constante qui dépend des caractéristiques de la spire.

La loi de Faraday appliquée à ce cas d'auto-induction donne alors : $e = -K \frac{di}{dt}$

3. Notion d'inductance

Le coefficient K qui apparaît dans les deux équations précédentes se note communément L et est appelé **self-inductance** ("inductance par elle-même") ou de façon plus courte **inductance**. Son unité est le Henry (H) pour rendre hommage à Joseph Henry, scientifique américain. La lettre L , quant à elle, a été choisie pour rendre hommage à Lenz.

Pour calculer l'ordre de grandeur d'une inductance, on prend le cas d'une bobine longue de longueur l et d'axe Oz (ou solénoïde) constituée de N spires et parcourue par un courant i . On notera la surface d'une spire S . On pose que la longueur l est très grande devant le rayon de la bobine. On rappelle que dans cette approximation le champ magnétique est nul à l'extérieur de la bobine et qu'à l'intérieur il s'écrit :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 N i}{l} \vec{u}_z$$

Le calcul du flux propre de ce champ à travers 1 spire de la bobine s'écrit :

$$\phi_0 = \iint_S \vec{B} \cdot \vec{n} dS = \frac{\mu_0 N i}{l} S$$

Qui devient à travers les N spires : $\phi = \frac{\mu_0 N^2 i}{l} S = L i$

On identifie alors l'expression de l'inductance L de la bobine : $L = \frac{\mu_0 N^2}{l} S$

qui ne dépend que des caractéristiques géométriques de la bobine et de la perméabilité magnétique du milieu au sein de la bobine. C'est donc une constante positive, quelle que soit la tension à laquelle elle sera soumise.

Application numérique : $N = 1000$ spires ; $l = 0,25m$; Rayon d'une spire $r = 3cm$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} Hm^{-1}$.

On obtient $L = 1,4 \cdot 10^{-3} H$.

L'inductance d'une bobine sera donc de l'ordre du milliHenry.

Si on veut des inductances plus importantes, il faudra insérer un noyau de fer doux (fer ou acier doux = ajouts d'éléments chimiques au fer, silicium, nickel, molybdène par exemple, pour en modifier les propriétés) dans la bobine, ce matériau a la propriété de se polariser magnétiquement (sa perméabilité μ est importante) et donc d'augmenter le champ magnétique à l'intérieur de la bobine donc son inductance.

