

Induction électromagnétique

Le cours de magnétostatique a permis de mettre en évidence que les courants sont des sources de champs magnétiques. Dans ce chapitre, on va mettre en évidence qu'un champ magnétique peut, dans certaines conditions, générer un courant : c'est l'induction électromagnétique. On verra ainsi naître l'idée que les champs électrique et magnétique sont intimement liés. On découvrira ici les lois relatives à l'induction et de nombreuses applications (freinage par courants de FOUCAULT, transformateur, chargeur, moteur, cuisson...).

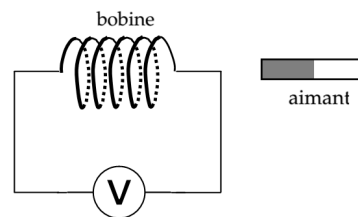
A. Mise en évidence expérimentale

A.1 Expérience A

Lorsqu'on approche une bobine d'un aimant, une différence de potentiels (tension) apparaît aux bornes de la bobine. Dès que la bobine est immobile, la tension s'annule. Quand on éloigne la bobine, une tension de signe opposé apparaît.

Les effets sont identiques si c'est l'aimant qui est en mouvement.

Si le mouvement est lent, la tension est faible.



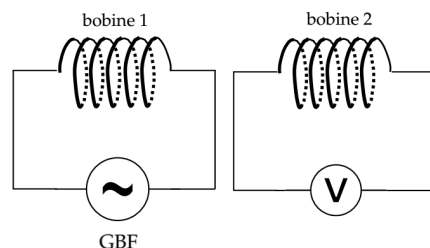
Résultat EM3.1 -

Le mouvement relatif d'une bobine et d'un aimant crée une tension induite dans la bobine. Cette tension est d'autant plus importante que le phénomène est rapide. L'orientation du circuit/aimant influe sur le signe de la tension induite.

A.2 Expérience B

Un GBF alimente une bobine avec une tension sinusoïdale. Cette bobine génère donc un champ magnétique variable. Les deux bobines sont fixes et ne sont pas en contact électrique. On observe une tension induite de même période aux bornes de la seconde bobine.

En conservant la même amplitude pour l'alimentation de la bobine 1, on en fait varier la fréquence. On observe que l'amplitude du signal mesuré dans la seconde bobine diminue.



Résultat EM3.2 -

Un champ magnétique variable crée une tension induite variable dans une bobine baignant dans ce champ. Ce phénomène est d'autant plus important que la fréquence du champ B est importante.

A.3 Bilan

Propriété EM3.1 -

Un signal est induit dans un conducteur lorsque :

- il y a un mouvement du conducteur : c'est l'induction de LORENTZ
- celui-ci est soumis à un champ magnétique variable dans le temps : c'est l'induction de NEUMANN.

L'amplitude du signal créé semble liée à la rapidité du phénomène inducteur.

B. Lois de FARADAY et LENZ

B.1 Loi de LENZ

Loi EM3.1 - Loi de LENZ

Les phénomènes d'induction, par leurs effets, tendent à s'opposer aux causes qui les ont produits.

La loi de LENZ est une loi de modération.

Il est important de comprendre l'induction ne crée pas un champ magnétique qui s'oppose au champ inducteur (qui crée le phénomène), mais à ses variations.

L'aimant crée un champ dirigé vers la droite sur le schéma ci-dessous : la partie grisée est le pôle Nord de l'aimant.

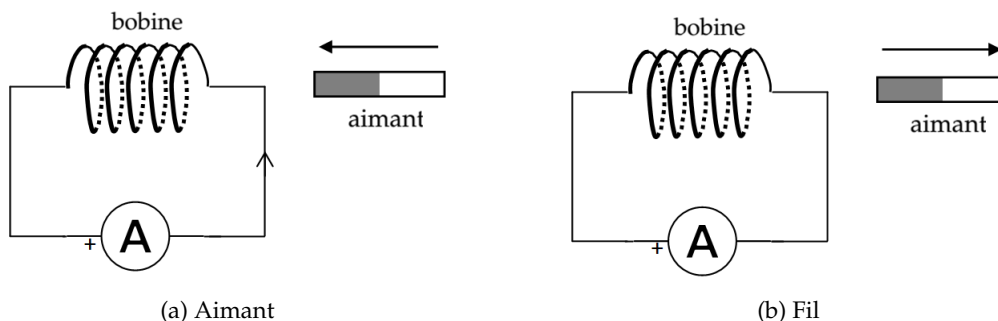


FIGURE 1 – Illustration de la loi de LENZ

A l'approche de l'aimant, le champ perçu augmente. La bobine réagit en créant un courant comme indiqué sur le schéma. Ce courant induit crée un champ magnétique dirigé vers la droite. Le flux du champ magnétique est augmenté par l'approche de l'aimant. La bobine réagit donc en créant un champ qui va s'opposer à cette augmentation du flux : champ vers la droite.

Quand l'aimant s'éloigne, le champ perçu diminue. La bobine réagit en créant un courant comme indiqué sur le schéma. Ce courant induit crée un champ magnétique dirigé vers la gauche. Le flux du champ magnétique diminue quand l'aimant s'éloigne. La bobine réagit en créant un champ qui s'oppose à cette diminution de flux : champ vers la gauche.

B.2 Loi de FARADAY (1831)

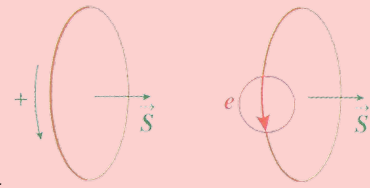
On note ϕ le flux du champ magnétique à travers le circuit C : $\phi = \iint_C \vec{B} d\vec{S}$. Ce flux ϕ est une grandeur algébrique : il est nécessairement défini après une orientation préalable du circuit qui permet de fixer le sens précis du vecteur surface $d\vec{S}$.

Loi EM3.2 - Loi de FARADAY

La force électromotrice e (V) engendrée dans un circuit répondant à une situation d'induction est donnée par l'opposé de la dérivée temporelle du flux ϕ du champ magnétique inducteur à travers ce circuit.

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

L'orientation de e est cohérente avec le sens d'orientation du circuit.



Cette loi a été établie empiriquement en premier lieu par FARADAY en 1831. Elle a ensuite été démontrée grâce aux équations de MAXWELL (chapitre EM4).

Remarques

- Le signe "-" dans la loi de FARADAY est une manifestation de la loi de LENZ
- Le flux magnétique, du fait de son utilisation en électrotechnique notamment, possède une unité propre : le Weber (Wb).

C. Induction de LORENTZ

On travaille dans cette partie avec un circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire.

C.1 Conversion d'énergie électro-mécanique (A TDEM3)

C.2 Conversion d'énergie mécano-électrique

D. Induction de NEUMANN

On travaille dans cette partie avec un circuit fixe dans un champ magnétique variable.

D.1 Induction mutuelle

On considère deux circuits ($\mathcal{C}_1$ et $\mathcal{C}_2$), **indéformables**, parcourus par des courants $i_1(t)$ et $i_2(t)$ dépendants du temps. Le circuit $\mathcal{C}_1$ génère donc un champ magnétique $\vec{B}_1(M, t)$ et le circuit $\mathcal{C}_2$ un champ magnétique $\vec{B}_2(M, t)$.

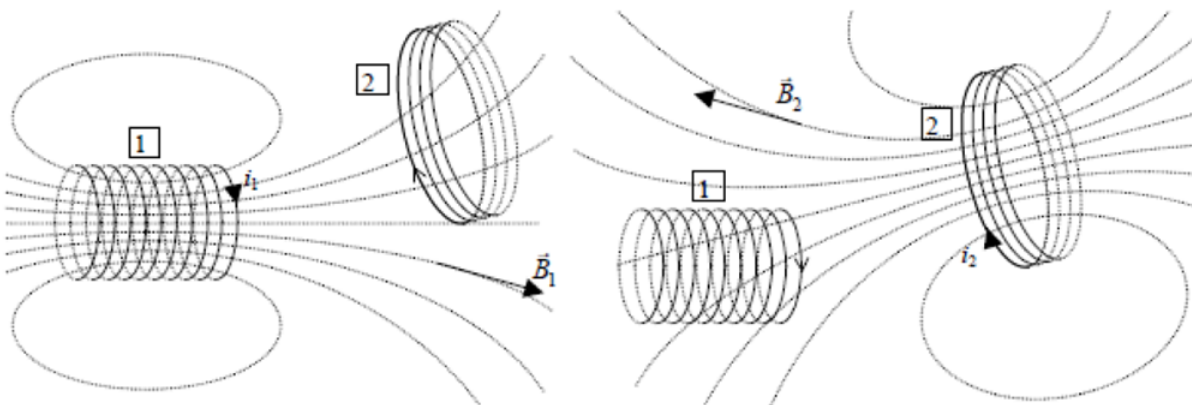


FIGURE 2 – Induction mutuelle M

$\mathcal{C}_2$ baigne dans le champ magnétique $\vec{B}_1(M, t)$ créé par le circuit $\mathcal{C}_1$. On peut donc définir $\phi_{1/2}$ le flux du champ $\vec{B}_1(M, t)$ à travers le circuit $\mathcal{C}_2$

$$\phi_{1/2} = \iint_{\mathcal{C}_2} \vec{B}_1 d\vec{S}$$

$\mathcal{C}_1$ baigne dans le champ magnétique $\vec{B}_2(M, t)$ créé par le circuit $\mathcal{C}_2$. On peut donc définir $\phi_{2/1}$ le flux du champ $\vec{B}_2(M, t)$ travers le circuit $\mathcal{C}_1$.

$$\phi_{2/1} = \iint_{\mathcal{C}_1} \vec{B}_2 d\vec{S}$$

Les deux circuits sont dans une situation d'**induction mutuelle**.

Comme le champ $\vec{B}_1(M, t)$ est proportionnel au courant $i_1(t)$, il en résulte que le flux $\phi_{1/2}$ est proportionnel à $i_1(t)$.

$$\phi_{1/2} = M_{1/2} i_1$$

Comme le champ $\vec{B}_2(M, t)$ est proportionnel au courant $i_2(t)$, il en résulte que le flux $\phi_{2/1}$ est proportionnel à $i_2(t)$.

$$\phi_{2/1} = M_{2/1} i_2$$

On admet le théorème de NEUMANN qui indique que $M_{1/2} = M_{2/1} = M$.

Définition EM3.1 - Coefficient d'induction mutuelle

M est le coefficient d'inductance mutuelle (ou inductance mutuelle). Il dépend uniquement de la constitution (géométrie + matériau) des circuits. Il s'exprime en Henry (H).

$$M = \frac{\phi_{1/2}}{i_1} = \frac{\phi_{2/1}}{i_2}$$

On a alors

$$\phi_{1/2} = Mi_1 \quad \text{et} \quad \phi_{2/1} = M.i_2$$

Ces deux flux étant variables, une fem d'induction e naît dans chaque circuit, satisfaisant la loi de FARADAY.

Les variations temporelles du courant $i_1(t)$ créent une différence de potentiel e_2 dans le circuit C_2 . Les variations temporelles du courant $i_2(t)$ créent une différence de potentiel e_1 dans le circuit C_1 .

$$e_2 = -\frac{d\phi_{1/2}}{dt} = -\frac{dMi_1}{dt} = -M\frac{di_1}{dt}$$

$$e_1 = -\frac{d\phi_{2/1}}{dt} = -\frac{dMi_2}{dt} = -M\frac{di_2}{dt}$$

Remarque

- ① Le phénomène d'induction mutuelle est d'autant plus important que le circuit siège de l'induction capte les lignes de champ de l'inducteur. M est ainsi d'autant plus grand.
- ② L'orientation des circuits (toujours d'actualité!) implique que le flux et le coefficient d'induction mutuelle M sont des grandeurs algébriques.

D.2 Auto-induction

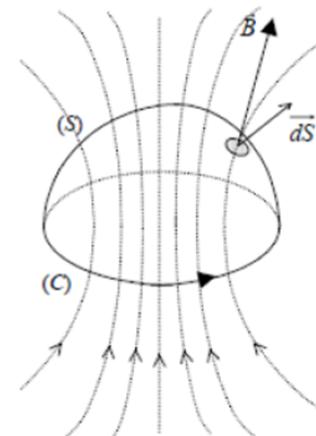
Un circuit C , parcouru par un courant d'intensité $i(t)$, baigne automatiquement dans le champ magnétique $\vec{B}(M, t)$ qu'il génère (**champ magnétique propre**).

Il existe donc nécessairement un **flux magnétique propre** ϕ_p , c'est à dire le flux à travers le circuit du champ qu'il génère.

$$\phi_p = \iint_C \vec{B} d\vec{S}$$

Comme le champ $\vec{B}(M, t)$ est proportionnel au courant $i(t)$, il en résulte que le flux ϕ_p est proportionnel à $i(t)$.

$$\phi_p = Li$$

**Définition EM3.2 - Coefficient d'auto-induction**

L est le coefficient d'auto-induction (ou inductance propre). Il dépend uniquement de la géométrie du circuit. Il s'exprime en Henry (H). Il est nécessairement positif.

$$L = \frac{\phi_p}{i}$$

Si le courant i est variable, le flux propre ϕ_p varie aussi. D'après la loi de FARADAY, cela implique la naissance d'une fem d'induction e au sein du circuit C :

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

Ainsi,

$$e = -\frac{d\phi_p}{dt} = -\frac{dLi}{dt} = -L\frac{di}{dt}$$

On voit ici la propriété des bobines étudiées en électricité : elle s'oppose aux variations de courant. En effet, si $di > 0$, alors le circuit réagit en opposant une force électromotrice négative $e < 0$. C'est l'expression directe de la loi de LENZ.

Le signe négatif apparaissant dans l'expression de e semble en opposition avec la loi constitutive des bobines idéales traitées en électrocinétique : $u_L = L\frac{di}{dt}$. Il n'en est rien, comme le montre la figure 3.

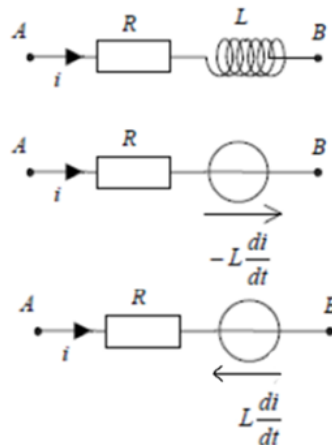


FIGURE 3 – Auto-induction et électrocinétique

On peut donc continuer à traiter les inductances comme en électrocinétique.

Remarques

- Enfin, il est important de dire qu'induction mutuelle et auto-induction peuvent tout à fait cohabiter au sein d'un circuit : les effets viennent se superposer.
- Les inductions de LORENTZ et de NEUMANN peuvent aussi venir se superposer.