

EP17 - Induction

Introduction

Au début du XVIII^e siècle, il est établi que l'électricité peut produire du magnétisme (expérience d'Ørsted). Les chercheurs de l'époque essaient alors en vain d'obtenir l'effet inverse : une production de magnétisme par l'électricité... Jusqu'à ce que Faraday découvre qu'il faut un champ magnétique variable pour engendrer un courant électrique : c'est l'**induction** [1].

Il détermine la **loi de Faraday** : la force électromotrice d'induction e est l'opposé de la variation du flux magnétique :

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

Expérience 1

Approcher/éloigner un aimant d'une bobine reliée à un galvanomètre [2].

Prévoir le sens du courant avec la loi de Lenz.

La **loi de Lenz** permet de prévoir le sens du courant induit : **la f.é.m induite engendre un courant qui s'oppose à la cause qui l'a produite.**

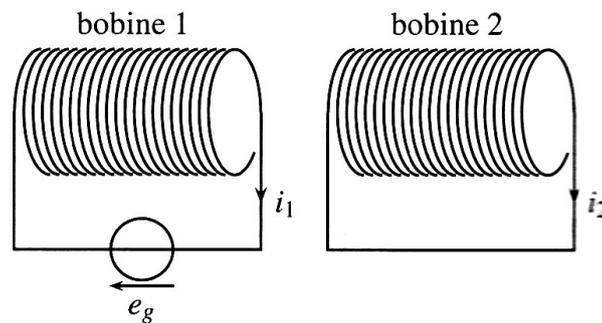
On peut distinguer plusieurs cas dans lesquelles le flux magnétique à travers un circuit peut varier :

- Le circuit électrique est fixe et le champ magnétique variable (alternateur, plaques à induction, transformateur). C'est dans ce cadre qu'on se placera pour la partie post-bac puisqu'on étudiera le fonctionnement d'un transformateur.
- Le circuit électrique est mobile et le champ magnétique est permanent (rail de Laplace, haut-parleur, freinage par courant de Foucault).
- Le circuit est mobile et le champ magnétique variable (moteur asynchrone).
- Le circuit est lui-même à l'origine du champ magnétique variable (bobine). On parle d'**autoinduction**.

Partie post-bac : étude de 2 circuits couplés par induction

Présentation

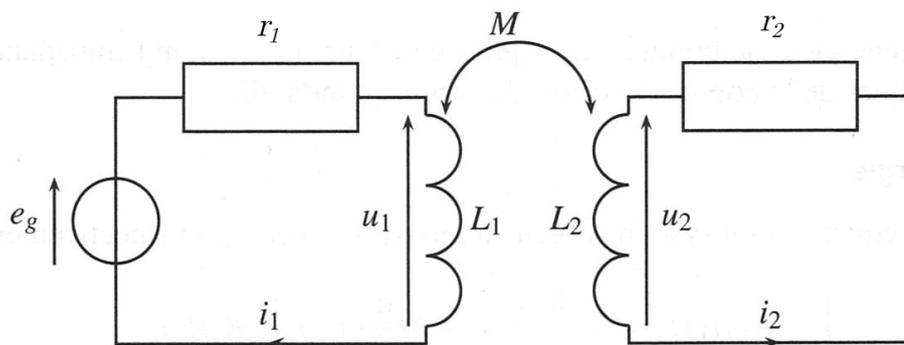
On considère deux circuits contenant chacun un bobinage.



Le deuxième circuit ne contient pas de générateur mais si on fait circuler un courant variable dans le premier, cela va générer un champ magnétique qui va faire apparaître une force électromotrice induite. Des courants d'intensités $i_1(t)$ et $i_2(t)$ vont donc circuler dans les circuits 1 et 2 dont on va essayer de déterminer les propriétés.

Équations

On commence par modéliser le circuit :



En appliquant la loi des mailles dans les deux circuits, on obtient ce système de deux équations :

$$\begin{cases} e_G = r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} & \text{circuit 1} \\ 0 = r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} & \text{circuit 2} \end{cases}$$

On suppose qu'on est dans le cas d'un régime sinusoïdale permanent. Le passage en notation complexe permet de simplifier les calculs :

$$\begin{cases} \underline{e_G} = (r_1 + jL_1\omega) \underline{i_1} + jM\omega \underline{i_2} \\ 0 = (r_2 + jL_2\omega) \underline{i_2} + jM\omega \underline{i_1} \end{cases}$$

De la deuxième équation, on trouve :

$$\underline{i_2} = \frac{-jM\omega}{r_2 + jL_2\omega} \underline{i_1} \quad (1)$$

et en remplaçant dans la première, on trouve :

$$\underline{e}_G = \left(r_1 + jL_1\omega + \frac{(M\omega)^2}{r_2 + jL_2\omega} \right) \underline{i}_1 = \underline{Z} \underline{i}_1$$

La bobine du circuit 1 se comporte donc comme un dipôle ayant une impédance \underline{Z} qui dépend des caractéristiques de la bobine 2 (à cause du couplage inductif).

Courant induit

On peut déterminer quelques propriétés du courant induit $i_2(t)$ de l'équation 1.

En prenant le module de l'équation 1, on trouve l'amplitude I_2 de $i_2(t)$:

$$\underline{I}_2 = \frac{|M|\omega}{\sqrt{r_2^2 + L_2^2\omega^2}} \underline{I}_1$$

On retrouve naturellement le fait que si $\omega = 0$, il n'y a pas de courant induit dans le circuit 2.

On constate aussi que l'amplitude de $i_2(t)$ tend vers une limite maximale $I_{2\max} = |M|/L_2$ à haute fréquence.

On peut également déterminer le déphasage entre $i_2(t)$ et $i_1(t)$ en calculant l'argument :

$$\Delta\phi = \arg\left(\frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_1}\right) = \arg\left(\frac{-jM\omega}{r_2 + jL_2\omega}\right) = \arg(-jM\omega) - \arg(r_2 + jL_2\omega)$$

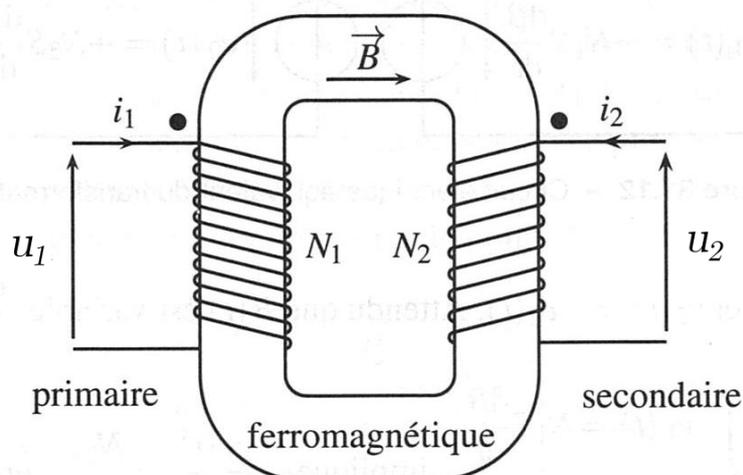
$$\Delta\phi = \begin{cases} -\frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{L_2\omega}{r_2}\right) & \text{si } M > 0 \\ \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{L_2\omega}{r_2}\right) & \text{si } M < 0 \end{cases}$$

On en déduit qu'à haute fréquence, le déphasage tend vers $-\pi$ (i_1 et i_2 sont en opposition de phase) quand M est positif et que le déphasage tend vers 0 (i_1 et i_2 sont en phase) quand M est négatif.

Ce résultat se comprend à partir de la loi de Lenz...

Transformateur

Ce type de couplage est utilisé dans le transformateur.



Pour simplifier le problème, on suppose que les résistances des bobines sont négligeables (pas de pertes par effet Joule), que le couplage entre les bobines est total grâce au noyau de fer qui canalise les lignes de champ et qu'il n'y a pas de perte par effet Joule dans le noyau de fer à cause des courants de Foucault (noyau feuilleté).

On note Φ_1 et Φ_2 les flux du champ magnétique **total** à travers une spire du primaire et à travers une spire du secondaire. Comme les mêmes lignes de champ traversent chaque spire, on a :

$$\phi_1 = \pm\phi_2$$

selon le sens d'enroulement.

Au primaire, on a :

$$u_1(t) = -\frac{d}{dt}(\Phi_1(t)) = -\frac{d}{dt}(N_1\phi_1(t)) = -N_1\frac{d}{dt}(\phi_1(t))$$

De même au secondaire, on a :

$$u_2(t) = -N_2\frac{d}{dt}(\phi_2(t))$$

Comme $\phi_1 = \pm\phi_2$ à chaque instant, on a :

$$\frac{u_2(t)}{N_2} = \pm\frac{u_1(t)}{N_1}$$

ou

$$\frac{u_2(t)}{u_1(t)} = \pm\frac{N_2}{N_1} = m \quad (\text{rapport de transformation})$$

Pour augmenter la tension au niveau du secondaire (tension élevée pour le transport sur le réseau), il faudra donc un nombre de spire beaucoup plus élevé sur le secondaire et inversement si on veut diminuer la tension au niveau du secondaire (adaptateur pour chargeur...).

Partie pédagogique : l'alternateur

Présentation

Cette séquence se place dans le cadre du cycle 4 du collège en classe de troisième. Elle peut entrer dans le cadre d'un enseignement croisé avec la SVT ou d'autres matières sur la thématique du développement durable et de la gestion des ressources naturelles (par exemple dans un EPI).

Elle introduit l'alternateur comme exemple d'appareil permettant de convertir l'énergie d'une forme vers une autre (un point important du thème « L'énergie et ses conversions » du cycle 4).

L'énergie et ses conversions

Attendus de fin de cycle

- » Identifier les sources, les transferts, les conversions et les formes d'énergie.
- » Utiliser la conservation de l'énergie.
- » Réaliser des circuits électriques simples et exploiter les lois de l'électricité.

Connaissances et compétences associées	Exemples de situations, d'activités et d'outils pour l'élève
Identifier les sources, les transferts, les conversions et les formes d'énergie Utiliser la conservation de l'énergie	
Identifier les différentes formes d'énergie. » Cinétique (relation $E_c = \frac{1}{2} mv^2$), potentielle (dépendant de la position), thermique, électrique, chimique, nucléaire, lumineuse. Identifier les sources, les transferts et les conversions d'énergie. Établir un bilan énergétique pour un système simple. » Sources. » Transferts. » Conversion d'un type d'énergie en un autre » Conservation de l'énergie. » Unités d'énergie. Utiliser la relation liant puissance, énergie et durée. » Notion de puissance	Les supports d'enseignement gagnent à relever de systèmes ou de situations de la vie courante Les activités proposées permettent de souligner que toutes les formes d'énergie ne sont pas équivalentes ni également utilisables. Ce thème permet d'aborder un vocabulaire scientifique visant à clarifier les termes souvent rencontrés dans la vie courante : chaleur, production, pertes, consommation, gaspillage, économie d'énergie, énergies renouvelables.

Un des objectifs principaux de la séquence est donc de revenir sur la **conversion d'énergie** et la façon de la représenter mais aussi de faire intervenir des connaissances ou compétences déjà vues précédemment afin de renforcer leur maîtrise du point de vue de l'élève. De la même façon, certaines notions vues ici seront également revues dans des chapitres ultérieurs.

La séquence comporte essentiellement trois parties :

- la découverte par des expériences qualitatives ;
- l'analyse de l'aspect énergétique ;
- une évaluation.

Expériences qualitatives

Avant de démarrer les expériences, on démarre la séquence par une situation déclenchante ou plutôt une interrogation : « comment produit-on l'électricité qu'on utilise ? » à laquelle on essaie de répondre en classe entière.

Les élèves ont déjà fabriqué une pile plus tôt dans l'année et certains proposent cette solution. D'autres évoquent les centrales électriques. On essaie de préciser en réfléchissant à la façon dont elle produisent de l'électricité...

Puis je leur propose de voir à partir de trois expériences comment l'électricité est produite dans ces centrales :

- principe de fonctionnement ;
- nature du courant produit ;
- conversion d'énergie.

TODO Matos

TODO Principe

TODO Nature du courant

TODO Aspect énergétique

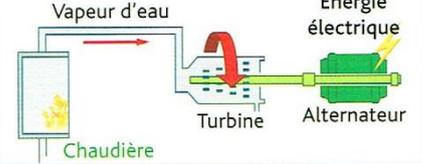
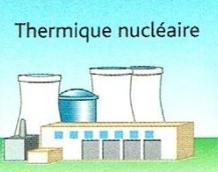
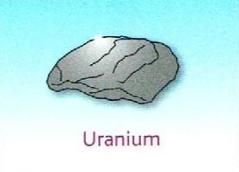
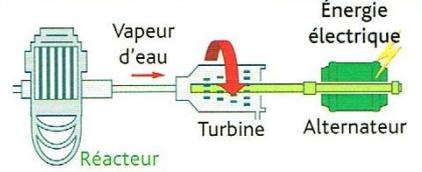
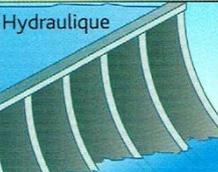
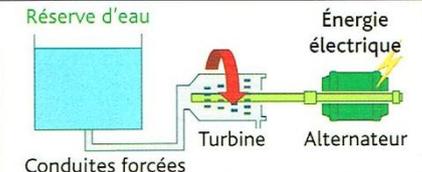
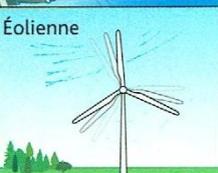
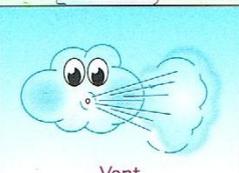
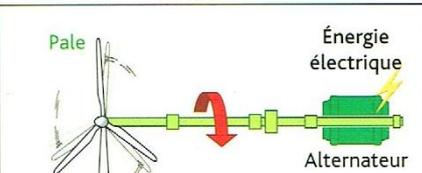
Diagramme d'énergie

TODO Représentation

Évaluation

TODO Ouverture sur la gestion des ressources naturelles

TODO Centrales (doc)

Type de centrale	Source primaire d'énergie	Schéma	Principe
	 <p>Charbon Gaz naturel Pétrole</p>	 <p>Vapeur d'eau Énergie électrique Chaudière Turbine Alternateur</p>	<p>Dans la chaudière, l'eau chauffée par la combustion du charbon, du gaz ou du pétrole se transforme en vapeur d'eau sous pression.</p>
	 <p>Uranium</p>	 <p>Vapeur d'eau Énergie électrique Réacteur Turbine Alternateur</p>	<p>L'énergie libérée par des atomes d'uranium permet le chauffage de l'eau et sa transformation en vapeur dans le réacteur.</p>
	 <p>Eau</p>	 <p>Énergie électrique Réservoir d'eau Turbine Alternateur Conduites forcées</p>	<p>L'eau accumulée derrière un barrage est dirigée vers les turbines par des tuyaux appelés conduites forcées.</p>
	 <p>Vent</p>	 <p>Énergie électrique Pales Alternateur</p>	<p>Le vent fait tourner les pales, correctement orientées, de l'éolienne.</p>

TODO Diagramme énergie

TODO Fonctionnement de l'alternateur (réinvestissement)

TODO Compétences

Bibliographie

- [1] E. Hecht, *Physique* (De Boeck Université/ITP, Paris Bruxelles, 1999).
- [2] J.P. Bellier, C. Bouloy, et D. Guéant, *Montages de physique au CAPES : Optique, mécanique, statique des fluides, calorimétrie : CAPES de physique et chimie* (Dunod, Paris, 2007).

Commentaires

- Attention au signe du déphasage : $\Delta\phi < 0$ pour un retard.
- Montrer un transfo.
- Guidage ferromagnétique pour minimiser la densité d'énergie magnétique : $e_m = B_0^2/2\mu_0\mu_r$.
- Suivre les compétences officielles.