CHAPITRE III

INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE

III.1. INTRODUCTION

Des expériences menées indépendamment, en Angleterre par Michael Faraday en 1831 et vers la même époque aux états unis par Josef Henry, ont montré qu'un courant électrique peut être induit dans un circuit au moyen d'un champ magnétique variable.

III.2. APPROCHE EXPERIMENTALE

Soit un circuit C_1 parcouru par un courant i_1, il crée en tout point de l'espace un champ magnétique. Plaçons dans ce champ un autre circuit fermé C_2 sans générateur et comportant un galvanomètre. Si i_1 est constant, on constate qu'aucun courant ne traverse C_2. Par contre dés que l'on modifie l'un des paramètres du système : courant dans le circuit C_1, position relative des deux circuits, on constate l'apparition dans C_2 d'un courant appelé courant induit. Une étude détaillée de toutes les circonstances expérimentales, y compris celles où le champ magnétique est produit par des aimants montre que l'apparition d'un courant induit dans un circuit fermé est toujours liée à une variation dans le temps du flux magnétique à travers le circuit.

III.3 LOI DE FARADAY (LOI D'INDUCTION DE FARADAY)

La force électromotrice induite dans un circuit conducteur est :

$$e(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt} \qquad (1)$$

Avec : $\Phi(t) = \iint_S \vec{B}.d\vec{s}$ (2)

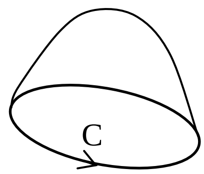
III.4 LOI DE LENZ

Le signe (-) dans la loi de Faraday a une signification bien précise donnée explicitement par la loi de Lenz en 1833 (loi qualitative).

Une augmentation du flux à travers un circuit ($d\Phi(t)/dt > 0$), entraîne l'apparition d'une f.é.m. qui tend à faire circuler un courant négatif. D'où la loi de Lenz : le sens du courant induit est tel que le champ magnétique propre qu'il crée tend à s'opposer à la variation du flux qui lui a donné naissance.

III.5 RELATION DE MAXWELL-FARADAY

Vu qu'un flux magnétique variable induit une f.e.m et un courant dans un circuit conducteur, on conclu donc qu'un champ électrique est produit dans le conducteur à cause du flux magnétique variable.



En général, la f.é.m. associée à n'importe quel parcours fermé est égale à la circulation du champ électrique induit autour de parcours fermé :

$$e(t) = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} \qquad (3)$$

D'après la loi de Faraday :

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt} \qquad (4)$$

D'après le théorème de stokes et la relation (2) on peut écrire : $\iint_S \overrightarrow{Rot}\,\vec{E} \cdot d\vec{s} = -\iint_S \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot d\vec{s}$

D'où on obtient : $\overrightarrow{Rot}\,\vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}$ (5)

C'est la $4^{ème}$ équation de Maxwell ou équation de Maxwell-Faraday.

Cette équation traduit localement une propriété du champ électromagnétique $(\vec{E}, \vec{B})$ qui montre qu'à *toute variation temporelle du champ magnétique est associée un champ électrique*.

III.6. LA F.E.M. INDUITE

III.6.1 La f.é.m. induite dans un conducteur fixe placé dans un champ magnétique variable

Quand le conducteur n'est pas en mouvement, seule la variation explicite du champ magnétique en fonction du temps contribue à la variation de flux donc à la production de cette f.é.m. :

$$e(t) = \oint \vec{E}.d\vec{l} = -\iint_S \frac{d\vec{B}}{dt}.d\vec{s} = -S\frac{dB}{dt} \qquad (6)$$

Dans ce cas, le champ électrique $\vec{E}$ est différent du champ électrostatique, en effet pour qu'il y ait phénomène d'induction, il est nécessaire que la circulation le long d'un chemin (courbe) fermé ne soit pas nulle.

Notons que, dans l'expression de *e(t)*, aucune caractéristique matérielle du circuit n'apparaît, ce qui est conforme au résultat de Faraday : *la f.é.m. induite est indépendante de la nature de matériau, elle ne dépend que de sa géométrie et des variations du flux magnétique*.

III.6.2. La f.é.m. induite dans un conducteur mobile placé dans un champ magnétique constant

Soit AB un conducteur rigide déplacé à la vitesse $\vec{v}$ par rapport au référentiel où règne un champ magnétique $\vec{B}$ uniforme et constant. Sous l'effet de la force magnétique $\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}$, les électrons libres vont se déplacer à l'extrémité du conducteur en laissant les charges + à l'autre extrémité. La circulation de cette force le long du conducteur que l'on déplace, et par unité de charge (ou on dit la circulation du champ électrique $\vec{E}_m = \vec{F}_m/q = \vec{v} \times \vec{B}$), donne la f.é.m. correspondante :

$$e_{AB} = \int_A^B (\vec{v} \times \vec{B}).d\vec{l} \qquad (7)$$

Si $\vec{B} = B\vec{k}$ et $\vec{v} = v\vec{\imath}$, on a : $e_{AB} = \int_A^B (\vec{v} \times \vec{B}).d\vec{l} = \int_A^B -vB.dy = -vBl$ (8)

Un état d'équilibre est rapidement atteint avec création à l'intérieur du conducteur d'un champ électrique induit $\vec{E}_{em}$. A l'état d'équilibre : $\vec{F}_m + \vec{F}_E = 0$ avec $\vec{F}_E = q.\vec{E}_{em}$ et on aura :

$$\vec{E}_{em} = -\vec{v} \times \vec{B} \qquad (9)$$

Dans ces conditions le conducteur devient l'équivalent d'une pile de f.é.m.

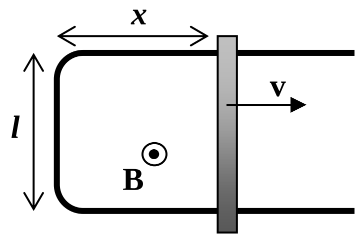
Dans le cas où le conducteur est un circuit fermé la f.é.m. induite est calculée par :

$$e(t) = \oint (\vec{v} \times \vec{B}).d\vec{l} \qquad (10)$$

La f.é.m. induite due au mouvement d'un conducteur est appelée f.é.m. motionnelle ou f.é.m. du flux coupé.

Exemple : Barreau conducteur mobile sur des rails

Considérons le système constitué d'un barreau conducteur AB, de longueur *l*, glissant à la vitesse $\vec{v} = v\vec{\imath}$, le long de deux rails parallèles, perpendiculairement à leur direction. Le système est placé dans un champ magnétique uniforme $\vec{B} = B\vec{k}$, perpendiculaire au plan du barreau et des rails.



Le calcul de la f.é.m. induite, dans le circuit fermé ci-dessus, en utilisant l'expression (13) conduit à :

$$e(t) = \oint (\vec{v} \times \vec{B}).d\vec{l} = \int_A^B (\vec{v} \times \vec{B}).d\vec{l} = -Bvl \qquad (11)$$

Si on utilise la loi de Faraday, on obtient :

$$e(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt} = -\frac{d\left[B.l.x(t)\right]}{dt} = -B.l.\frac{dx(t)}{dt} = -B.l.v \qquad (12)$$

Les résultats (11) et (12) sont identiques et le barreau conducteur joue le rôle d'une source de f.é.m.

III.6.3. Expression généralisée de la loi de Faraday

Dans le cas général où on a un circuit conducteur en mouvement dans un champ magnétique variable dans le temps, on combine les expressions (6) et (10) pour avoir :

$$e(t) = \oint_l \vec{E}.d\vec{l} = -\iint_S \frac{d\vec{B}}{dt}.d\vec{s} + \oint_l (\vec{v} \times \vec{B}).d\vec{l} \qquad (13)$$

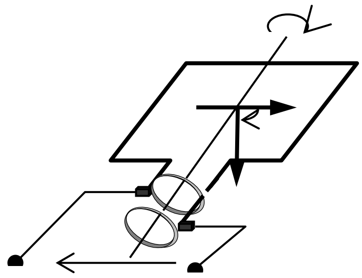
En utilisant le théorème de Stockes on obtient l'équation locale suivante :

$$\overrightarrow{Rot}\,\vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} + \overrightarrow{Rot}\,(\vec{v} \times \vec{B}) \qquad (14)$$

III.7. APPLICATIONS DE L'INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE

III.7.1. Spire rectangulaire dans un champ magnétique uniforme : principe de l'alternateur

Considérons une spire rectangulaire conductrice tournant à une vitesse angulaire ω (rad/s) autour de son axe et plongé dans champ d'induction magnétique $\vec{B}$ uniforme et constant.
A t=0, la boucle est horizontale, $\varphi = 0$.



$$\Phi(t) = \iint_{spire} \vec{B}.d\vec{S} = \iint_{spire} B.ds.\cos\varphi = B.\cos\omega t.\iint_{spire} ds = B.\cos\omega t.S$$

Ou : $\Phi(t) = B.S.\cos\omega t$

D'après la loi de Faraday la tension induite est donnée par :

$$e(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt} = \omega.B.S.\sin\omega t$$

La spire en rotation est donc le siège d'une tension induite *e(t)* alternative variant de façon sinusoïdale dans le temps. Ceci est le principe fondamental d'un générateur à induit mobile. Dans la pratique, la technologie peut être compliquée, mais le principe est toujours le même. En général, il y a des milliers de spires en rotation.
Dans le cas d'une bobine comportant N spires de surface S qui tourne à une vitesse angulaire ω, la f.é.m. induite est : $e(t) = \omega.N.B.S.\sin\omega t$

III.7.2. Courants de Foucault

Dans un conducteur se déplaçant dans un champ magnétique, la force magnétique met les charges en mouvement et des courants induits prennent naissance. Pour un conducteur filiforme, le trajet du courant est géométriquement bien défini. Dans un conducteur volumique, les courants circulent dans la masse du conducteur perpendiculairement au flux magnétique, on les appelle aussi *courants de Foucault*. L'énergie qu'ils reçoivent est dissipée en chaleur par effet Joule dans le conducteur.
Dans les transformateurs ce phénomène est nuisible (parasite), c'est pour cela que leurs noyaux en fer doux sont en tôles feuilletées, les discontinuités introduites dans la masse augmentent la résistance et diminuent l'importance des courants. Dans le domaine du chauffage par induction, ces courants sont utilisés pour chauffer commodément des métaux ou des corps non conducteurs placés dans un creuset métallique. La partie métallique chauffée forme le secondaire d'un transformateur.
Un conducteur mobile, du fait de ces courants, est soumis à des forces de Laplace qui s'opposent au mouvement et il y a alors freinage. Ça peut être un effet parasite dont on cherche à diminuer l'importance, ou un effet désiré comme le freinage électromagnétique des véhicules automobiles.