

# 9. Induction électromagnétique

**Michaël Faraday** Surrey 1791- Middlesex 1867

Relieur de son métier, il prend goût aux livres, particulièrement ceux de Physique et devient technicien à la Royal Institution en 1813. Après la découverte d'Oersted en 1822, il propose la notion de ligne de champ et montre la possibilité d'extraire de l'énergie électrique à partir de l'énergie mécanique. En 1831 il découvre expérimentalement le phénomène d'induction.

Il prouve l'identité entre l'électricité fournie par une pile électrochimique et l'électricité statique obtenue par frottement. Il introduit les notions d'électrode et d'ions (anions et cations), de cathode et d'anode, et en déduit que l'électricité est responsable des liaisons chimiques.

En électrostatique, il analyse l'électrisation par influence. Il a également découvert l'électroluminescence et l'influence d'un champ magnétique sur la polarisation d'une onde.

De manière générale, il est l'inspirateur de Maxwell qui le cite abondamment.

À la question: "A quoi peut servir l'induction?" qui lui était posée, Michaël Faraday répondit: " Qui peut dire à quoi sert un nouveau né? "

Loi de Faraday en électrolyse, loi de Faraday en électromagnétisme, cage de Faraday en électrostatique, effet Faraday (rotation de la polarisation de la lumière)

Le Farad: unité de capacité

## I. Lois de l'induction pour un circuit fermé

Elles ont été trouvées expérimentalement entre 1831 et 1834. Faraday observe que pour un circuit électrique fermé placé en présence d'un champ magnétique, un courant apparaît lorsque le flux magnétique varie, quelle que soit la cause de variation du flux. Il décrit cette mise en mouvement des charges par l'apparition d'une force électromotrice  $e$  telle que  $\vec{f}$  étant la force microscopique s'exerçant sur un porteur de charge  $q$ ,  $e = \frac{1}{q} \oint \vec{f} \cdot d\vec{l}$ . Cette force  $\vec{f}$  est à circulation non nulle et fournit du travail aux porteurs de charge.

La loi de Faraday s'exprime par:

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

où  $\phi$  est le flux magnétique à travers le circuit. Attention, l'orientation du vecteur surface est cohérente avec l'orientation du circuit. Le flux est la superposition du flux propre (créé par le circuit lui-même) et du flux créé par le champ magnétique extérieur.

La loi de Lenz est une loi de modération :

*Les effets de l'induction s'opposent à la cause qui leur a donné naissance.*

\*\*\* L'orientation relative du circuit et de la surface est essentielle. C'est la première chose à faire quand on se trouve face à un exercice d'induction

## II. Cas d'un circuit fixe dans un champ magnétique dépendant du temps (cas de Neumann)

L'équation de Maxwell Faraday  $\vec{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$  montre qu'à champ magnétique variable est associé à un champ électrique "induit", même **en l'absence de milieu matériel**.

Le champ électrique n'est pas à circulation conservative *a priori*. Dans la suite on se place dans l'ARQS (magnétique).

## II.1. Circuit filiforme

### II.1.a. Loi de Faraday

Pour un circuit filiforme fermé:  $e = \frac{1}{q} \oint \vec{f} \cdot d\vec{l} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l}$ , soit  $e = -\frac{d}{dt} \iint \vec{B} \cdot d\vec{S}$ . On retrouve la loi de Faraday:

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

avec pour un simple conducteur filiforme ohmique constituant un circuit fermé :

$$e = Ri$$

De même un circuit ohmique alimenté par une tension  $u(t)$  vérifie alors en convention récepteur:  $u(t) = Ri(t) - e$ .

### II.1.b. Autoinduction

Un circuit parcouru par un courant crée un champ magnétique et donc un flux qui lui est propre. La valeur algébrique de  $\vec{B}$  dans l'ARQS est proportionnelle à  $i$  et il s'en suit que :

$$\phi_{propre} = Li$$

Le flux magnétique total à travers le circuit est :  $\phi = \phi_{ext} + \phi_{propre}$ . La f.é.m.

$$e = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d\phi_{ext}}{dt} - L\frac{di}{dt}$$

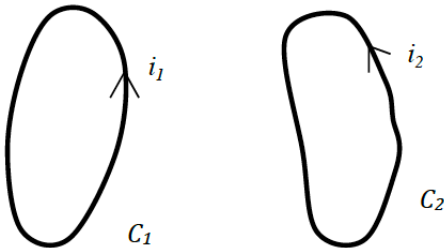
Le coefficient  $L$  est en Henry, c'est l'inductance propre du circuit. Un circuit ohmique alimenté par une tension  $u(t)$  sans champ extérieur vérifie alors en convention récepteur:  $u(t) = Ri(t) - e = Ri(t) + L\frac{di}{dt}$ . Le bilan de puissance s'écrit dans ce cas :

$$ui = Ri^2 + \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}Li^2\right)$$

$\frac{1}{2}Li^2$  apparaît comme un terme énergétique. C'est l'énergie magnétique emmagasinée dans le circuit, dont on vérifie qu'elle a même valeur que l'énergie magnétique exprimée à partir des équations de Maxwell:  $E_{mag} = \iiint \frac{B^2}{2\mu_0} d\tau$ . On en déduit que  $L$  est positive.

Application : calcul de l'inductance propre d'un solénoïde "infini" par la méthode directe ( $\phi_{propre} = Li$ ) ou par la méthode énergétique.

## II.2. Cas de deux circuits filiformes fixes indéformables



Le flux magnétique à travers un circuit est la somme des flux créés par lui-même et par l'autre circuit :

$$\phi_1 = L_1i_1 + M_{21}i_2$$

$$\phi_2 = M_{12}i_1 + L_2i_2$$

On admet que les deux coefficients  $M_{21}$  et  $M_{12}$  sont égaux : c'est le coefficient de mutuelle inductance ou mutuelle (en Henry)

L'énergie magnétique emmagasinée est :

$$E_{mag} = \frac{1}{2}L_1i_1^2 + Mi_1i_2 + \frac{1}{2}L_2i_2^2$$

Remarque :  $|M| \leq \sqrt{L_1L_2}$

## II.2. Conducteur non filiforme

Pour un conducteur ohmique non filiforme: Dans le volume du conducteur apparaissent des courants dits "courants de Foucault" associés à une densité de courant  $\vec{j} = \gamma\vec{E}$ .

## III. Cas d'un circuit mobile dans un champ extérieur permanent (cas de Lorentz)

### III.1. Loi de Faraday

Dans le référentiel lié au circuit, on est ramené au cas précédent. On admet ainsi qu'apparaît dans un circuit fermé filiforme une f.e.m, la cause de variation du flux étant maintenant le mouvement du conducteur

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

Pour un conducteur ohmique, la loi d'Ohm se généralise en l'absence de générateur :

$$0 = Ri - e$$

Cas particulier 1. Circuit en translation

Cas particulier 2: Circuit en rotation autour d'un axe fixe

### III.2. Aspect énergétique

Le mouvement d'un conducteur dans un champ magnétique provoque l'apparition d'une f.e.m. induite, et éventuellement d'un courant induit. De la puissance électrique est donc ainsi créée. Un bilan énergétique montre que la somme de la puissance des forces de Laplace et de la puissance électrique  $ei$  est nulle: il y a **conversion électromécanique** parfaite.

$$P_{Laplace} + ei = 0$$

Remarque : l'équation ci-dessus peut être une méthode de détermination de la f.é.m.

Dans le cas d'un circuit mobile en présence d'un champ magnétique dépendant du temps, la loi de Faraday s'applique, quelle que soit la cause de variation du flux magnétique.

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

## **Applications**

Elles sont multiples et nous en utilisons tous les jours. Toute l'électrotechnique résulte du phénomène d'induction.

Entre autres applications :

Transformateurs, haut-parleurs, moteurs électriques (à courant continu, asynchrone), dynamos, freinage électromagnétique, four à induction, transformateurs, puces RFID (radio frequency identification), ...