

Circuit fixe dans un champ magnétique variable

29

Dans ce chapitre, on étudie des phénomènes d'induction dans des circuits fixes mettant en jeu des champs magnétiques variant dans le temps.

1 Auto-induction

1.1 Inductance propre

Imaginons un circuit filiforme, parcouru par un courant d'intensité i , une spire par exemple, bien que ce puisse être n'importe quel autre circuit plus compliqué. Il crée un champ magnétique \vec{B} , dont la norme est proportionnelle à l'intensité i du courant qui le traverse. Attendu que les lignes de champ magnétique s'enroulent autour de leurs sources, ce champ magnétique traverse le circuit qui lui a donné naissance, il crée donc un flux magnétique à travers ce circuit, nommé **flux propre**.

L'expression de ce flux magnétique propre, noté φ_p , est compliquée car le champ n'est pas nécessairement uniforme sur toute la surface du circuit. Toutefois, φ_p est proportionnel à la norme de \vec{B} , qui est elle même proportionnelle à l'intensité i du courant ; φ_p est finalement proportionnel à i .

Le flux, à travers un circuit, de son propre champ magnétique s'écrit :

$$\varphi_p = Li,$$

où i est l'intensité dans le circuit et L le **coefficient d'auto-inductance** du circuit.

Le coefficient d'auto-inductance est noté L ¹. On l'appelle aussi **inductance propre**.

1. En l'honneur de Heinrich Lenz.

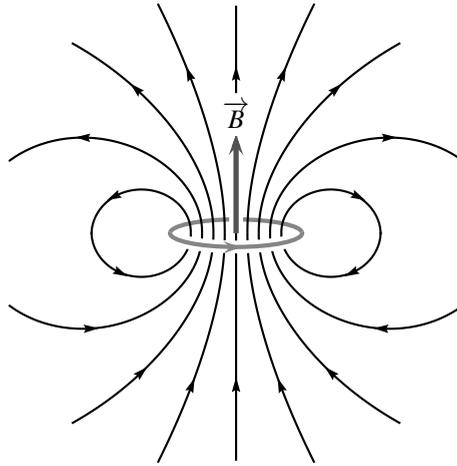


Figure 29.1 – Lignes de champ magnétique, en noir, d'une spire circulaire, en gris.

L'unité d'inductance est le **henry**², noté H.

Comment exprimer les henrys dans les unités de base du système international ? On montre, dans le chapitre sur le champ magnétique, que les teslas T, unités du champ magnétique, sont des $\text{kg.s}^{-2}.\text{A}^{-1}$. De plus, le flux magnétique est en webers Wb :

$$\varphi = \vec{B} \cdot \vec{S} \quad \text{donc} \quad \text{Wb} = \text{T.m}^2 = \text{kg.s}^{-2}.\text{A}^{-1}.\text{m}^2.$$

Et :

$$\varphi_p = Li \quad \text{donc} \quad \text{Wb} = \text{H.A} \quad \text{soit} \quad \text{H} = \text{m}^2.\text{kg.s}^{-2}.\text{A}^{-2}.$$

Ce résultat n'est pas à retenir, mais la méthode suivie doit être connue. Il montre l'intérêt à utiliser une unité dérivée afin d'alléger les notations.

L'unité d'inductance est le henry, dont le symbole est H.

L'auto-inductance d'un circuit est toujours *positive*. Il est possible de le vérifier en considérant la figure 29.1 (sur cette figure la flèche indique le sens réel du courant) si on choisit pour sens positif le long de la spire ce même sens, alors $i > 0$ et, en appliquant la règle de la main droite, on constate que le champ magnétique traverse la surface de la spire dans le sens positif donc que $\varphi_p > 0$. Les deux sont négatifs si on fait le choix inverse. Le signe du flux propre est le même que celui de l'intensité. Cela provient du fait que la règle de la main droite donne à la fois le sens positif de traversée de la surface du circuit à partir du sens conventionnel du courant et la direction du champ magnétique à partir du sens réel du courant. Ainsi l'autoinductance est positive, quel que soit le sens positif du courant choisi.

2. En l'honneur de Joseph Henry, 1797 – 1878, physicien américain, successivement professeur de « natural philosophy » à Princeton, directeur de la Smithsonian Institution et président de la National Academy of Sciences. Ses travaux abordèrent avec éclectisme de nombreux thèmes, dont la météorologie. Il reste célèbre pour sa découverte des phénomènes d'auto-induction et de mutuelle induction, exposés dans son article de 1838, *On Electro-Dynamic Induction*. Faraday découvrit en même temps ces phénomènes au Royaume-Uni, mais Henry publia en premier.

Remarque

Dans le cas d'un circuit comportant N spires identiques, le champ magnétique est proportionnel à N . De plus, le flux à travers le circuit est égal à N fois le flux à travers une spire. Le coefficient d'inductance propre est donc proportionnel à N^2 .

1.2 Calcul d'une inductance propre

Le but est d'établir l'expression de l'inductance propre L d'une bobine longue de longueur ℓ , nommée solénoïde, constituée de N spires, chacune parcourue par un courant d'intensité i , de surface S .

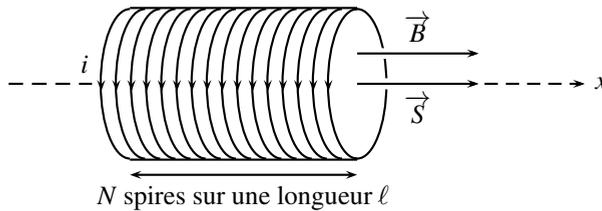


Figure 29.2 – Solénoïde dont on calcule l'inductance propre.

Soit $n = \frac{N}{\ell}$ le nombre de spires par unité de longueur de la bobine. Alors le champ magnétique créé dans la bobine a pour expression :

$$\vec{B} = \mu_0 n i \vec{u}_x = \mu_0 \frac{N}{\ell} i \vec{u}_x.$$

Le flux de ce champ à travers une seule spire est :

$$\varphi_{1 \text{ spire}} = \vec{B} \cdot \vec{S} = \mu_0 \frac{N}{\ell} i S.$$

Le flux total à travers les N spires, c'est à dire le flux propre à travers la bobine, est :

$$\varphi_p = N \varphi_{1 \text{ spire}} = \mu_0 \frac{N^2}{\ell} i S.$$

On identifie alors l'expression de l'autoinductance :

$$\varphi_p = Li = \mu_0 \frac{N^2}{\ell} i S \quad \text{donc} \quad L = \mu_0 \frac{N^2}{\ell} S.$$

Par exemple, pour une bobine de 1000 spires de rayon $a = 3$ cm, réparties sur une longueur $\ell = 10$ cm :

$$L = 4\pi \cdot 10^{-7} \times \frac{1000^2}{10 \cdot 10^{-2}} \times \pi (3 \cdot 10^{-2})^2 = 35 \text{ mH}.$$

1.3 Circuit électrique équivalent

Si l'intensité du courant traversant le circuit varie dans le temps, le flux propre varie et il apparaît donc une force électromotrice induite, nommée force électromotrice autoinduite, qui s'exprime avec la loi de Faraday :

$$e(t) = -\frac{d\varphi_p}{dt} = -L\frac{di}{dt},$$

si l'auto-inductance L est une constante, c'est à dire si les caractéristiques géométriques du circuit ne varient pas.

En prenant soin de bien orienter bien la f.é.m. induite dans le même sens que l'intensité du courant (voir chapitre précédent), on peut dessiner le schéma électrique équivalent :

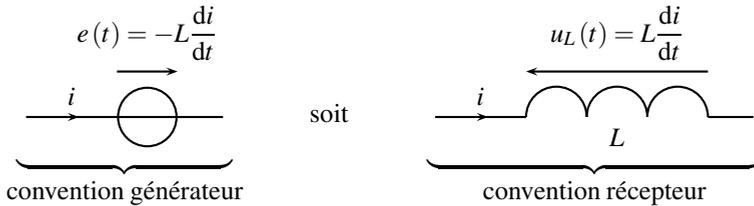


Figure 29.3 – Schéma électrique équivalent pour l'autoinduction.

On voit donc que la f.é.m. auto-induite peut être représentée soit par un générateur de f.é.m. $e(t)$, orienté en convention générateur, soit par le symbole normalisé d'une inductance L , avec une tension $u_L(t)$ à ses bornes, orientée en convention récepteur.

Remarque

Dans le cas où le circuit est plongé dans un champ magnétique extérieur, par exemple le champ terrestre, un flux supplémentaire à travers le circuit s'ajoute au flux propre, $\varphi_{tot} = \varphi_p + \varphi_{ext}$. Dans ce cas, la f.é.m. induite est :

$$e(t) = -L\frac{di}{dt} - \frac{d\varphi_{ext}}{dt}.$$

Cette f.é.m. additionnelle due au champ magnétique extérieur forme du bruit électrique, par exemple dans le cas d'un téléphone portable dont la position bouge, même faiblement, dans le champ terrestre. On minimise ce bruit en éliminant toutes les inductances des circuits électroniques, sachant qu'au besoin, une inductance est simulée avec des résistances, des condensateurs et des amplificateurs linéaires intégrés.

1.4 Loi de Lenz

Les formules trouvées sont cohérentes avec la loi de modération de Lenz. Examinons par exemple une bobine, branchée sur un générateur extérieur qui fait croître le courant dans la bobine : $\frac{di}{dt} > 0$. Alors, $e = -L\frac{di}{dt} < 0$ et d'après le schéma électrique de la figure 29.3, cette f.é.m. induite négative s'oppose à l'augmentation du courant.

1.5 Mesure d'une inductance propre

On mesure expérimentalement la valeur de l'autoinductance L en l'insérant dans un circuit série comportant un générateur de force électromotrice $e_g(t)$ et une résistance R_0 :

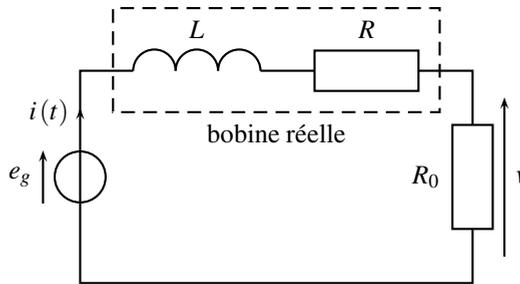


Figure 29.4 – Montage électrique pour la mesure de l'autoinductance.

Les fils de cuivre qui constituent la bobine présentent une résistance R . On ajoute au circuit une résistance connue R_0 très supérieure à R . Ainsi, la résistance de l'ensemble est-elle $R_0 + R \simeq R_0$. L'ensemble est alors régi par l'équation différentielle du premier ordre, écrite sous forme canonique :

$$\begin{cases} e_g(t) = L \frac{di}{dt} + R_0 i(t) \\ v(t) = R_0 i(t) \end{cases} \quad \text{donc} \quad \frac{L}{R_0} \frac{dv}{dt} + v(t) = e_g(t).$$

On mesure la constante de temps $\tau = \frac{L}{R_0}$ grâce au temps de montée à 63%, dans le cas où la tension d'alimentation $e_g(t)$ est un signal créneau de grande période par rapport à τ . Cette méthode est détaillée dans le chapitre d'électricité sur les circuits linéaires du premier ordre. La valeur de τ mène à celle de L , attendu que celle de R_0 est connue.

1.6 Étude énergétique

On reprend le montage électrique de la figure 29.4. Afin de mener un bilan de puissance, on multiplie la loi des mailles par $i(t)$:

$$e_g(t) \times i(t) = L \frac{di}{dt} \times i(t) + R_0 i(t)^2.$$

Attendu que $\frac{di}{dt} \times i(t) = \frac{d}{dt} \left(\frac{i^2}{2} \right)$:

$$e_g i = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L i^2 \right) + R_0 i^2.$$

Le terme $e_g i$ représente la puissance délivrée par le générateur, qui se répartie en deux contributions :

- une puissance $R_0 i^2$, dissipée par effet Joule dans la résistance R_0 ,
- une puissance $\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} Li^2 \right)$, stockée dans la bobine.

Il apparaît dès lors que de l'énergie est stockée dans la bobine, et que cette énergie s'écrit $\frac{1}{2} Li^2 + \text{constante}$. Il s'agit de l'énergie du champ magnétique créé par la bobine. Si l'intensité s'annule, le champ magnétique s'annule aussi et l'énergie magnétique aussi, ce qui montre que la constante est égale à zéro.

L'énergie magnétique d'un circuit d'auto-inductance L parcouru par un courant d'intensité i est :

$$\mathcal{E}_{\text{magné}} = \frac{1}{2} Li^2.$$

2 Deux circuits en interaction

2.1 Inductance mutuelle

Imaginons un circuit filiforme \mathcal{C}_1 , parcouru par un courant d'intensité i_1 , une spire par exemple, bien que ce puisse être n'importe quel autre circuit plus compliqué. Il crée un champ magnétique \vec{B}_1 , dont la norme est proportionnelle à l'intensité i_1 du courant qui le traverse. Un circuit \mathcal{C}_2 est disposé dans le champ \vec{B}_1 dont il intercepte des lignes de champ. Ainsi \vec{B}_1 a-t-il un flux à travers \mathcal{C}_2 que l'on note $\varphi_{1 \rightarrow 2}$. C'est le flux envoyé par le circuit \mathcal{C}_1 à travers le circuit \mathcal{C}_2 .

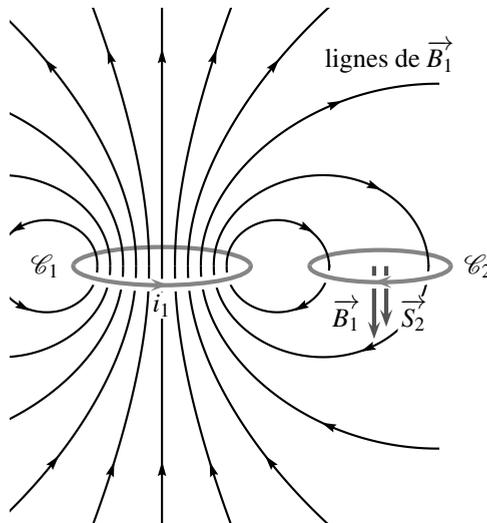


Figure 29.5 – Deux circuits magnétiquement couplés.

L'expression de ce flux magnétique $\varphi_{1 \rightarrow 2}$ est compliquée car \vec{B}_1 n'est pas nécessairement uniforme sur toute la surface du circuit \mathcal{C}_2 . Toutefois, $\varphi_{1 \rightarrow 2}$ est proportionnel à la norme de

\vec{B}_1 , qui est elle-même proportionnelle à l'intensité i_1 du courant ; $\varphi_{1 \rightarrow 2}$ est donc finalement proportionnel à i_1 .

De même, si \mathcal{C}_2 est parcouru par le courant i_2 il envoie un flux magnétique $\varphi_{2 \rightarrow 1}$ à travers \mathcal{C}_1 qui est proportionnel à i_2 . Les coefficients de proportionnalité entre $\varphi_{1 \rightarrow 2}$ et i_1 et entre $\varphi_{2 \rightarrow 1}$ et i_2 sont identiques : leur valeur commune est notée M . Ce résultat constitue le théorème de **Neumann**³ que l'on admettra ici.

M est appelé **inductance mutuelle** entre les deux circuits \mathcal{C}_1 et \mathcal{C}_2 . M s'exprime en **henry**.

Les flux magnétiques envoyés réciproquement par un circuit \mathcal{C}_1 et un circuit \mathcal{C}_2 l'un à travers l'autre sont donnés par les formules :

$$\varphi_{1 \rightarrow 2} = M i_1 \quad \text{et} \quad \varphi_{2 \rightarrow 1} = M i_2,$$

où M est appelé **inductance mutuelle** entre les deux circuits \mathcal{C}_1 et \mathcal{C}_2 .

L'inductance mutuelle se mesure en henry, de symbole H.



L'intensité du courant qui apparaît dans l'expression de ces flux est à chaque fois l'intensité dans le circuit qui crée le champ magnétique.

Le signe de l'inductance mutuelle est arbitraire. Il dépend de l'orientation relative des deux circuits.

2.2 Circuits électriques équivalents

On considère l'ensemble de deux circuits, \mathcal{C}_1 et \mathcal{C}_2 , de la figure 29.5.

\mathcal{C}_1 est parcouru par le courant d'intensité i_1 . Ce courant crée un champ magnétique \vec{B}_1 , donc un flux propre $\varphi_{1,p}$ à travers \mathcal{C}_1 : $\varphi_{1,p} = L_1 i_1$.

\mathcal{C}_2 est parcouru par i_2 , qui crée le champ \vec{B}_2 . \vec{B}_2 envoie un flux $\varphi_{2 \rightarrow 1}$ à travers \mathcal{C}_1 : $\varphi_{2 \rightarrow 1} = M i_2$.

Le flux total à travers \mathcal{C}_1 est donc :

$$\varphi_1 = \varphi_{1,p} + \varphi_{2 \rightarrow 1} = L_1 i_1 + M i_2.$$

La f.é.m. induite dans \mathcal{C}_1 est alors :

$$e_1(t) = -\frac{d\varphi_1}{dt} = -L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt}.$$

On procède de même pour la f.é.m. induite dans \mathcal{C}_2 :

$$\varphi_2 = \varphi_{2,p} + \varphi_{1 \rightarrow 2} = L_2 i_2 + M i_1 \quad \text{donc} \quad e_2(t) = -L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt}.$$

3. nommé d'après son découvreur, Franz Ernst Neumann, 1798 – 1895, physicien allemand, professeur à l'université de Königsberg, dont les recherches portèrent sur la cristallographie, la thermodynamique, les ondes lumineuses et l'induction.

On en déduit les circuits électriques équivalents aux deux spires :

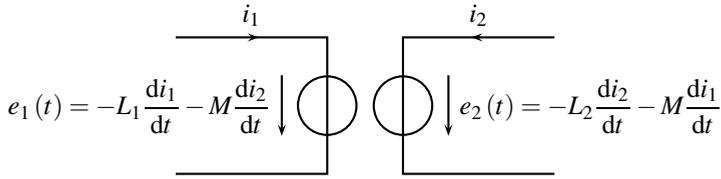


Figure 29.6 – Circuits électriques équivalents (convention générateur).

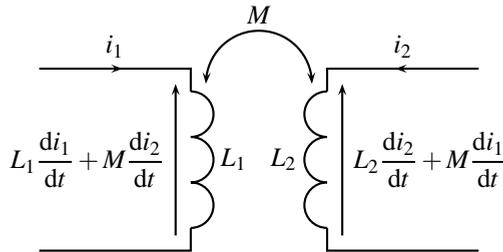


Figure 29.7 – Circuits électriques équivalents (convention récepteur).

2.3 Étude harmonique

On considère l'ensemble de deux circuits, \mathcal{C}_1 et \mathcal{C}_2 , de la figure 29.5, couplés par mutuelle induction. \mathcal{C}_1 , de résistance électrique R_1 , est alimenté par un générateur qui impose la tension $v_1(t) = V_0 \cos(\omega t)$. Quant à \mathcal{C}_2 , de résistance électrique R_2 , il est court-circuité.

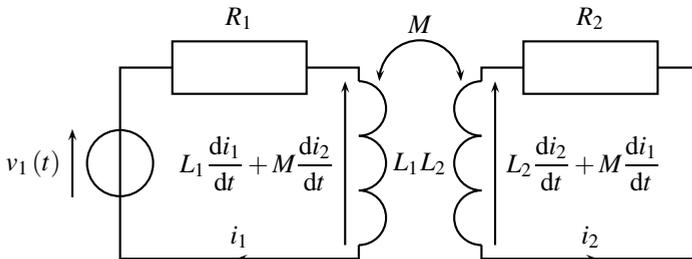


Figure 29.8 – Circuits couplés étudiés.

La loi des mailles mène aux équations couplées :

$$\begin{cases} v_1(t) = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + R_1 i_1 \\ 0 = L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} + R_2 i_2 \end{cases}$$

En régime sinusoïdal permanent à la pulsation ω , imposée par $v_1(t)$:

$$\begin{cases} \underline{v}_1(t) = (R_1 + jL_1\omega) \underline{i}_1(t) + jM\omega \underline{i}_2(t) \\ 0 = (R_2 + jL_2\omega) \underline{i}_2(t) + jM\omega \underline{i}_1(t) \end{cases}$$

On peut dès lors, par exemple, établir le schéma électrique équivalent vu du circuit \mathcal{C}_1 . La seconde équation mène à :

$$\underline{i}_2(t) = -\frac{jM\omega}{R_2 + jL_2\omega}\underline{i}_1(t),$$

qu'on injecte dans le première :

$$\begin{aligned} \underline{v}_1(t) &= (R_1 + jL_1\omega)\underline{i}_1(t) - \frac{(jM\omega)^2}{R_2 + jL_2\omega}\underline{i}_1(t) \\ \underline{v}_1(t) &= \underbrace{\left(R_1 + jL_1\omega - \frac{(jM\omega)^2}{R_2 + jL_2\omega}\right)}_{\underline{Z}}\underline{i}_1(t) \end{aligned}$$

Le couplage entre les deux circuits est équivalent, vu du circuit \mathcal{C}_1 , à un unique dipôle d'impédance \underline{Z} , dans lequel intervient les caractéristiques de \mathcal{C}_2 via la couplage inductif.

2.4 Étude énergétique

Pour les circuits couplés de la figure 29.8, multiplions par i_1 et i_2 les équations électriques :

$$\begin{cases} v_1(t)i_1(t) = L_1 \frac{di_1}{dt}i_1(t) + M \frac{di_2}{dt}i_1(t) + R_1 i_1(t)^2 \\ 0 = L_2 \frac{di_2}{dt}i_2(t) + M \frac{di_1}{dt}i_2(t) + R_2 i_2(t)^2 \end{cases}$$

Additionnons ces équations :

$$\begin{aligned} v_1 i_1 &= \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 \right) + \underbrace{M \frac{di_1}{dt} i_2 + M \frac{di_2}{dt} i_1}_{= \frac{d}{dt} (M i_1 i_2)} + R_1 i_1^2 + R_2 i_2^2, \\ &= \frac{d}{dt} (M i_1 i_2) \end{aligned}$$

soit :

$$v_1 i_1 = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + M i_1 i_2 \right) + R_1 i_1^2 + R_2 i_2^2.$$

La puissance $v_1 i_1$ délivrée par le générateur extérieur se répartit en deux termes :

- une puissance $R_1 i_1^2 + R_2 i_2^2$, perdue par effet Joule dans les deux circuits,
- une puissance magnétique qui dérive d'une énergie magnétique du circuit \mathcal{C}_1 $\left(\frac{1}{2} L_1 i_1^2\right)$, du circuit \mathcal{C}_2 $\left(\frac{1}{2} L_2 i_2^2\right)$, et du couplage entre les deux circuits $(M i_1 i_2)$.

L'énergie magnétique de deux circuits, couplés par mutuelle induction, est :

$$\mathcal{E}_{\text{magné}} = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + M i_1 i_2.$$

3 Transformateur de tension (PTSI)

3.1 Constitution

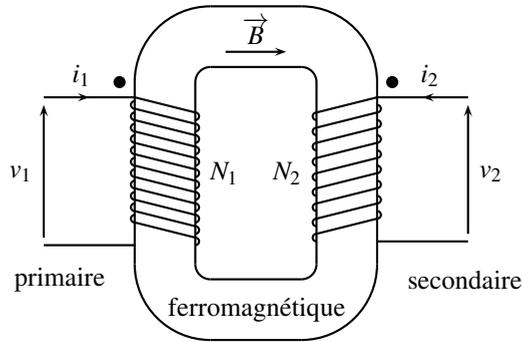


Figure 29.9 – Transformateur.

Un **transformateur** est un appareil qui modifie l'amplitude de tensions et de courants alternatifs.

Il se compose d'une carcasse **ferromagnétique**, et de deux enroulements. Le matériau ferromagnétique est choisi pour sa capacité à canaliser les lignes de champ magnétique, de même qu'un tuyau canalise un liquide en écoulement. Ainsi, il n'existe de champ magnétique qu'à l'intérieur du « circuit magnétique » formé par le ferromagnétique. Les enroulements sont constitués de fils de cuivre, bobinés autour du circuit magnétique.

L'enroulement primaire, ou plus simplement le **primaire**, ici constitué de N_1 spires, est celui qui reçoit l'énergie électrique, que restitue à la charge l'enroulement secondaire, ou **secondaire**, constitué de N_2 spires.

La signification des points ● sera abordée au paragraphe 3.3.

3.2 Principe de fonctionnement

Le primaire, soumis à la tension alternative $v_1(t)$, est parcouru par le courant alternatif d'intensité $i_1(t)$. Ce courant $i_1(t)$ crée un champ magnétique variable $\vec{B}(t)$. Le ferromagnétique canalise ce champ jusqu'au secondaire. Le champ variable $\vec{B}(t)$ crée alors un flux variable dans l'enroulement secondaire. Une f.é.m. est donc induite au secondaire.

Quel est le lien entre $v_2(t)$, tension au secondaire, et $v_1(t)$, tension au primaire ?

Soit S la section du circuit magnétique. Le flux de $\vec{B}(t)$ à travers une section droite, c'est-à-dire orthogonale au champ magnétique, est donc $B(t)S$. Le flux total à travers les N_1 spires du primaire est donc $\varphi_1(t) = N_1 B(t)S$, celui au secondaire est $\varphi_2(t) = N_2 B(t)S$. Les f.é.m. induites au primaire et au secondaire sont alors :

$$e_1(t) = -\frac{d\varphi_1}{dt} = -N_1 S \frac{dB}{dt} \quad \text{et} \quad e_2(t) = -N_2 S \frac{dB}{dt}.$$

Le schéma électrique équivalent est donc, en se souvenant bien que les f.é.m. induites sont dans le même sens que les courants :

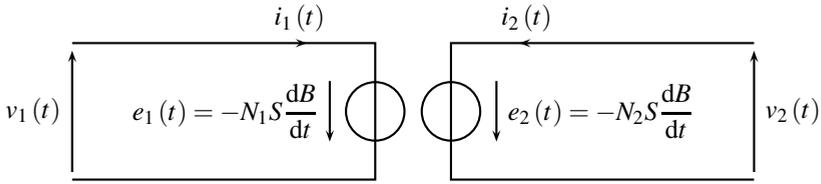


Figure 29.10 – Circuit électrique équivalent du transformateur.

Ainsi $v_1 = -e_1$ et $v_2 = -e_2$. Attendu que $B(t)$ est variable, $\frac{dB}{dt}$ est différent de 0 :

$$\begin{cases} v_1(t) = N_1 S \frac{dB}{dt} \\ v_2(t) = N_2 S \frac{dB}{dt} \end{cases} \text{ implique } \frac{v_2(t)}{v_1(t)} = \frac{N_2}{N_1} = m.$$

où $m = \frac{N_2}{N_1}$ est le rapport de transformation.



La formule précédente n'est valable que pour des tensions alternatives. En régime indépendant du temps, $v_2 = 0$: **un transformateur ne laisse pas passer le continu.**

Les tensions primaire et secondaire, dans un transformateur en régime alternatif, sont reliées par le **rapport de transformation** m :

$$\frac{v_2(t)}{v_1(t)} = \frac{N_2}{N_1} = m.$$

3.3 Normalisation et orientation des courants

Le schéma normalisé du transformateur est :

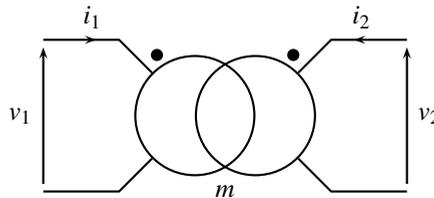


Figure 29.11 – Schéma normalisé d'un transformateur.

Il apparaît ici le besoin de préciser très correctement l'orientation des courants et la signification des points (●) au primaire et au secondaire.

Observons la figure 29.9. Au primaire, le courant d'intensité i_1 entre par la borne marquée du point. D'après la règle de la main droite, il crée un champ magnétique orienté dans le sens positif, arbitrairement choisi et indiqué sur la figure. De même au secondaire, le courant

d'intensité i_2 entre lui aussi par la borne marquée du point et crée, pareillement, un champ magnétique orienté dans le sens positif.

La signification des points est claire : tout courant qui entre par le point (●) crée, dans le matériau ferromagnétique, un champ magnétique orienté dans le sens positif choisi.

Quand on dessine les enroulements, comme sur la figure 29.9, le sens d'enroulement et le point sont redondants. Mais le sens des enroulements n'existe plus sur le schéma de la figure 29.11 ; le marquage des points y est impératif.

Que se passe-t-il quand le courant n'entre pas par le point ?

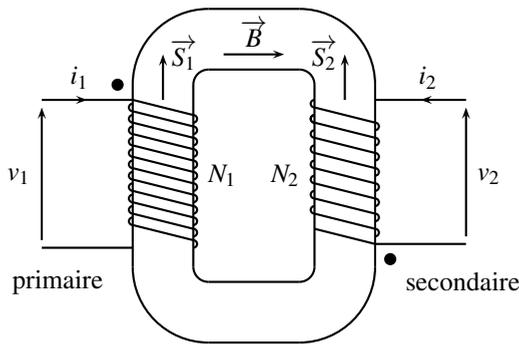
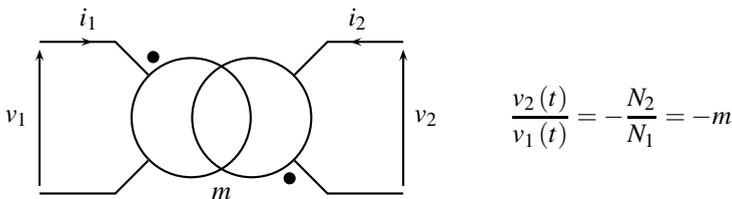


Figure 29.12 – Gestion des points dans un transformateur.

Sur la figure 29.12, le courant d'intensité i_2 n'entre pas par le point. Ce courant oriente les spires du secondaire, donc leur vecteur surface \vec{S}_2 d'après la règle de la main droite, de telle manière que le flux au secondaire devient négatif, $\varphi_2(t) = -N_2SB(t)$. Dès lors, $u_2(t) = -e_2(t) = \frac{d\varphi_2}{dt} = -N_2S\frac{dB}{dt}$. Le lien entre la tension primaire et secondaire devient :



$$\frac{v_2(t)}{v_1(t)} = -\frac{N_2}{N_1} = -m$$

Figure 29.13 – Gestion des points avec le schéma normalisé d'un transformateur.

Il convient donc de vérifier le câblage du transformateur pour utiliser correctement le lien entre les tensions primaire et secondaire.

3.4 Courants de Foucault

Le matériau ferromagnétique est soumis à un champ magnétique variable. Des f.é.m. sont donc induites dans le volume. Attendu que le matériau est conducteur, des courants induits apparaissent. Ces courants, qui circulent dans la masse du ferromagnétique, sont nommés **courants de Foucault**⁴, ou *eddy currents* en anglais.

Les courants de Foucault sont responsables de pertes par effet Joule. Afin de les minimiser, voire même de les supprimer, on **feuillette** le matériau ferromagnétique en le constituant de tôles minces, jusqu'à 0,3 mm d'épaisseur, séparées par une couche isolante aussi mince que possible, 10^{-2} mm ou moins. La couche isolante bloque la circulation du courant et prévient les pertes par effet Joule.

Les pertes par courants de Foucault sont supprimées dans un transformateur en feuilletant le matériau ferromagnétique.

3.5 Utilisation

La principale utilité des transformateurs est d'abaisser ou d'élever des tensions alternatives. Citons, par exemple, les transformateurs EDF qui transforment la moyenne tension 20 kV en tension domestique 400 V, ou bien les transformateurs des chargeurs de portable, aisément identifiables car ils en forment la partie la plus volumineuse et la plus lourde.

Un transformateur permet aussi d'isoler électriquement deux circuits. On l'utilise en **transformateur d'isolement** pour lequel le rapport de transformation est $m = 1$. La tension secondaire est une copie conforme de la tension primaire alternative. Les circuits primaire et secondaire n'ont aucun lien électrique. Ils peuvent en particulier avoir deux masses différentes, sans risquer de court-circuit.

4. En l'honneur de leur découvreur, le français Léon Foucault, 1819 – 1868. Léon Foucault est très célèbre pour son expérience dite du pendule de Foucault, réalisée sous la coupole du Panthéon, à Paris, en 1851, grâce à laquelle il démontra l'influence de la rotation de la Terre sur le mouvement d'un pendule pesant. On lui doit aussi une mesure de la vitesse de la lumière.

SYNTHÈSE

SAVOIRS

- ordre de grandeur de l'inductance propre d'une bobine de grande longueur
- énergie magnétique mutuelle
- utilisation du transformateur

SAVOIR-FAIRE

- différencier le flux propre des flux extérieurs
- calcul de l'inductance propre d'une bobine de grande longueur
- mesurer la valeur de l'inductance propre d'une bobine
- établir le système d'équations couplées en régime sinusoïdal de deux circuits couplés par mutuelle induction
- conduire un bilan d'énergie pour l'auto-induction
- conduire un bilan d'énergie pour l'induction mutuelle
- établir la loi des tensions pour un transformateur (PTSI)

MOTS-CLÉS

- | | | |
|------------------|----------------------|-------------------------|
| • auto-induction | • auto-inductance | • inductance mutuelle |
| • flux propre | • induction mutuelle | • transformateur (PTSI) |