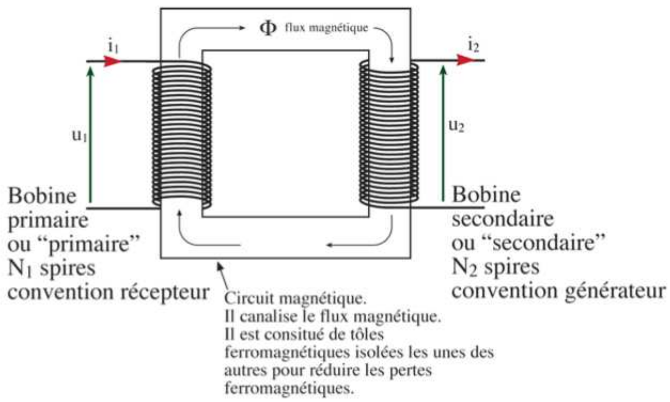
Transformateurs : définitions et expériences

1. Introduction : milieux ferromagnétiques

En résumé, pour le moment, nous avons vu que $\boxed{\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M}}$ qui peut s'écrire, avec un modèle simple $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$, sous la forme $\boxed{\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}}$. On a vu également que la réponse non-linéaire des ferromagnétique induit un cycle d'hysteresis.

2. Présentation des transformateurs

2. 1 Schéma



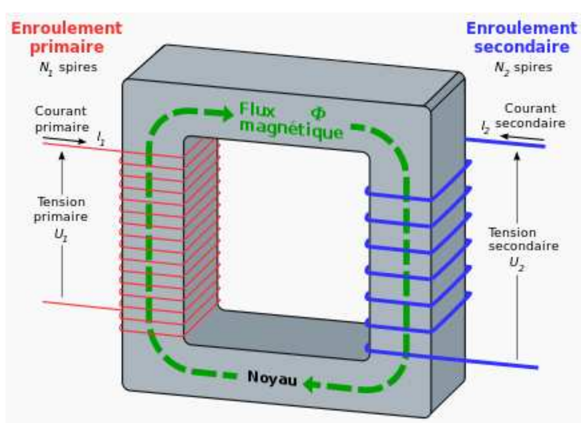
Le courant i_1 est dû à un circuit connecté à la bobine du "primaire" : on peut modéliser avec un générateur de Thévenin, c'est-à-dire une fem e_1 et une résistance R_1.
Pour la bobine du secondaire, le courant i_2 est créé par le phénomène d'induction et le plus souvent, on ne place qu'une résistance R_2 connectée à la bobine.

►ATTENTION : le courant i_2 est orienté sur le schéma pour indiquer que l'énergie est fournie à la résistance R_2. Néanmoins, il est courant d'orienter i_2 dans le sens opposé pour rendre le schéma symétrique, afin de pouvoir permuter primaire et secondaire si besoin.

2. 2 Principe de fonctionnement

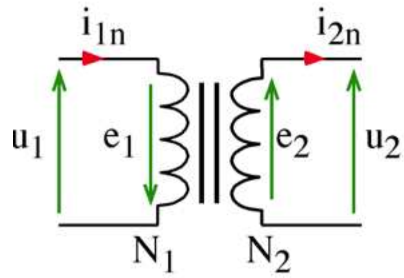
Loi de Faraday : une variation de flux à travers une spire créer une f.é.m. e. Inversement une f.é.m. e dans une spire crée une variation de flux à travers celle-ci.

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



C'est ce phénomène qui est exploité dans le transformateur.

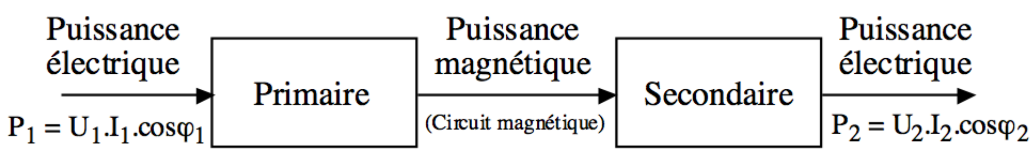
Les équations de Mawxell permettent de justifier des propriétés :
►$div\vec{B} = 0$ implique la conservation du flux $\Phi = cste$.
►le fait que le matériau est choisi avec $\mu_r \gg 1$ implique que les LDC sont canalisées et que $B_{ext} \approx 0$.



⚠ Le sens du courant i_{2n} (et donc e_2) est souvent utilisé à l'envers de cette notation afin de rendre symétrique le primaire et le secondaire.

Fonctionnement : i_{2n} (et donc e_2) à l'envers de la notation du schéma
►le flux capté par le primaire est $\Phi_1 = \Phi_{1\to 1} + \Phi_{1\to 2}$ avec $\Phi_{1\to 1} = L_1 i_1$ et $\Phi_{2\to 1} = Mi_2$
►le flux capté par le secondaire est $\Phi_2 = \Phi_{2\to 2} + \Phi_{2\to 1}$ avec $\Phi_{2\to 2} = L_2 i_2$ et $\Phi_{1\to 2} = Mi_1$
⚠aux bornes du primaire $u_1 = -e_1 = \dfrac{d\Phi_1}{dt} = L_1\dfrac{di_1}{dt} + M\dfrac{di_2}{dt}$
⚠aux bornes du secondaire $u_2 = -e_2 = \dfrac{d\Phi_2}{dt} = L_2\dfrac{di_2}{dt} + M\dfrac{di_1}{dt}$

2. 3 Transformation d'énergie

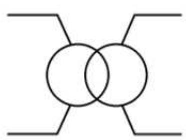


$P_1 = U_1 I_1 \cos\varphi$ est le bilan de puissance comme vu au chapitre 15

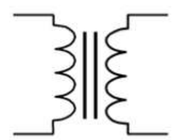
Les pertes "fer" sont les pertes par courants de Foucault et les pertes par hysteresis.

Les pertes "cuivre" sont les pertes par effets Joule dans les fils au primaire et au secondaire.

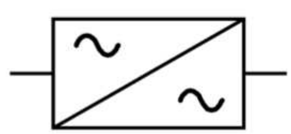
2. 4 Symboles



ou



On a un système électrique : le transformateur est un convertisseur $\boxed{\text{statique}}$ (pas de pièce en mouvement). Il transforme une tension sinusoïdale en une autre tension sinusoïdale de valeur efficace différente.



2. 5 Modèle simplifié de transformateur

? Exercice 1: Inductance propre L du primaire ou du secondaire

Comment calcule-t-on L ? La définition est $L_1 = \dfrac{\Phi_{1\to 1}}{i_1}$

EXEMPLE : cas du solénoïde infini. Montrer que l'inductance linéique $\mathscr{L}$ d'un solénoïde infini est $\mathscr{L} = \dfrac{L}{\ell} = \mu_0 n^2 S$ pour $\ell \gg 1$ la longueur du solénoïde.

.

Exercice 2: Inductances mutuelles M dans le transformateur

Calcul de M ? La définition est $M = \dfrac{\Phi_{1\to 2}}{i_1} = \dfrac{\Phi_{2\to 1}}{i_2}$
EXEMPLE : cas de deux bobines coaxiales

.

Exercice 3: Equations différentielles liées au transformateur

Ecrire les équations différentielles linéarisées en complexe pour le transformateur au complet

.

3. TRANSFORMATEUR PARFAIT

3. 1 Définitions

Conditions sur $\mu_r \to \infty$:
il n'y a pas de pertes de LDC, le flux Φ est "guidé" totalement par le matériau magnétique.

3. 2 Définition du rapport de transformation m

On a une transformation en tension $\boxed{m = \dfrac{U_2}{U_1} = \dfrac{N_2}{N_1}}$

On a $u_1 = -e_1 = \dfrac{\Phi_1}{dt} = N_1 \times \dfrac{\Phi}{dt}$ avec $\Phi = B.S$ pour une spire. De même $u_2 = -e_2 = \dfrac{\Phi_2}{dt} = N_2 \times \dfrac{\Phi}{dt}$ ce qui démontre donc la relation précédente.

si m > 1, le transformateur et élévateur de tension ; dans ce cas $u_2 > u_1$
si m < 1, le transformateur est abaisseur de tension.

Par exemple, pour les lignes ERDF, on produit à "basse tension", on élève ensuite ($m > 1$) pour le transport sur la ligne, puis avant l'utilisateur, on abaisse la tension. Nous verrons plus loin que la raison est la diminution des pertes sur la ligne de transport.

De plus on a une $\boxed{\text{transformation en courant}}$: on écrit $\boxed{m = \dfrac{I_2}{I_1} = -\dfrac{1}{m}}$

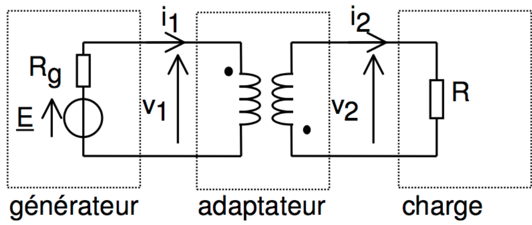
On applique le théorème d'AMPÈRE pour un contour fermé dans le matériau selon $\oint_{\mathscr{C}} \vec{H}.d\vec{\ell} = H \times \ell = N_1 i_1 + N_2 i_2$.
On a $B = \mu_0 \mu_r H$ avec $\mu_r \gg 1$.
On peut donc écrire $H \times \ell = \dfrac{B}{\mu_0 \mu_r} = N_1 i_1 + N_2 i_2 \approx 0$ ce qui donne $N_1 i_1 + N_2 i_2 \approx 0$ donc $\dfrac{i_2}{i_1} = -\dfrac{N_1}{N_2} = -\dfrac{1}{m}$

3. 3 Puissances

Comme le transformateur est parfait : $P_1 = P_2$ et $\phi_1 = \phi_2$.
cela signifie que 100% de la puissance P_1 au primaire est récupérée au secondaire.

En effet, $P_1 = u_1 i_1 = \dfrac{u_2}{m} \times (-m i_2) = -u_2 i_2 = P_2$

3. 4 Transfert d'impédance



On a donc un passage du secondaire au primaire qui donne $\boxed{R' = \dfrac{R}{m^2}}$

On a donc un passage du primaire au secondaire qui donne $\boxed{R'' = Rm^2}$

Exercice 4: APPLICATION à l'adaptation d'impédance

Montrer que le fait de placer un transformateur entre un générateur e_1, R_1 et une charge R_2 peut permettre d'augmenter la puissance fournie à la charge.

.

4. TRANSFORMATEUR REEL

4. 1 Rapport de transformation

Le rapport de transformation se mesure à vide (pas de charge, $I_2 = 0$)

$$\boxed{m = \frac{U_{20}}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}}$$

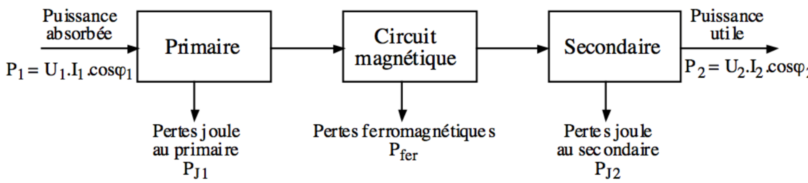
4. 2 Transformateur en charge

On constate une chute de tension : $U_2 < m.U_1$.

Plus I_2 augmente (la charge augmente) plus U_2 diminue.

Cette dernière observation vient du fait d'une chute de tension provoquée par la résistance du bobinage $\Delta U = r_2.I_2$ (si I_2 augmente ΔU augmente aussi).

4. 3 **Bilan énergétique**



Les pertes fer sont dues à l'hystérésis du matériau ferromagnétique et aux courants de Foucault. Les pertes fer sont proportionnelles à B_{max}^2 (donc à U_1^2) et à la fréquence f.

L'énergie accumulée pour $H : 0 \to H_m$ est $E_1 = V\int_{-B_r}^{B_m} HdB > 0$. Ensuite, pour $H : H_m \to 0$, l'énergie cédée est $E_2 = V\int_{B_m}^{B_r} HdB < 0$. Les pertes par hysteresis sont donc $\boxed{P_H = \frac{V}{T}\oint_{cycle} HdB = V.f.A}$ où A est l'aire du cycle.

Les pertes Foucault sont $P_F = K.V.f^2.B_m^2$

Bilan des puissances : $P_1 = P_{J,1} + P_{J,2} + P_{fer} + P_2$

4. 4 **Limitation des pertes fer**

Pour réduire les pertes par hystérésis, il faut choisir un matériau ferromagnétique avec un cycle d'hystérésis le plus étroit possible. VOIR COURS Ferromagnétisme

Pour réduire les pertes par courants de Foucault, le noyau est feuilleté. C'est-à-dire qu'il est constitué de tôles vernies, donc isolées les unes des autres. La taille des boucles de courant de Foucault est alors limitée par l'épaisseur de la tôle. Plus les boucles sont petites, plus les pertes sont réduites.

4. 5 **Rendement**

$\eta = \dfrac{P_2}{P_1} = \dfrac{P_2}{P_2 + P_{fer} + P_J}$ ou

$\eta = \dfrac{P_1 - P_{fer} - P_J}{P_1}$

Le rendement varie en fonction des conditions d'utilisation du transformateur. Le meilleur rendement s'obtiendra pour les grandeurs d'utilisation nominales indiquées sur la plaque signalétique du transformateur.

Les bons transformateurs de fortes puissances peuvent atteindre un rendement de 98%.

4. 6 **cas du transformateur réel dans le modèle linéaire**

(a) **Description et théorème d'Ampère**

(b) **Prise en compte des $\boxed{\textbf{pertes cuivre}}$: résistances r_1 et r_2**

$\boxed{P_C = (r_1 + \frac{r_2}{m^2}) I_1^2}$

(c) **Prise en compte des $\boxed{\textbf{courants de fuite}}$ (μ_r fini)**
On cherche un schéma équivalent.

Exemple du transfert d'impédance au primaire pour ce modèle :

(d) **Prise en compte du $\boxed{\textbf{courant magnétisant}}$**

On a $\boxed{i_1 - \dfrac{\Phi L}{S\mu_0\mu_r N_1} = -\dfrac{N_2}{N_1} i_2}$ d'où le courant magnétisant i_m :

Quelle est la nature du dipôle ? $i_1 - i_m = -\dfrac{1}{m} i_2$

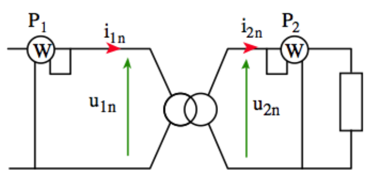
C'est une bobine L_m

(e) **Prise en compte des** $\boxed{\textbf{pertes fer}}$

5. Calcul du rendement : EXPERIENCES REALISABLES

5. 1 **Mesure directe**

Cette méthode consiste à mesurer avec deux wattmètres P_1 et P_2 si c'est possible.

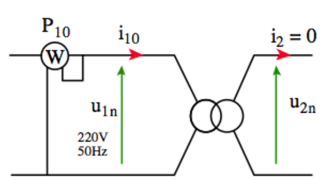


5. 2 **Méthode des pertes séparées**

Deux essais particuliers du transformateur permettent de mesurer séparément les pertes par effet joule (p_j) et les pertes ferromagnétiques (p_{fer}).

Cette méthode consiste à évaluer les différentes pertes dans les conditions nominales d'utilisation.

(a) Essai $\boxed{\text{à vide}}$: mesure des $\boxed{\text{pertes fer}}$



A vide le circuit secondaire est ouvert : $I_2 = 0$ donc $P_2 = 0$ et $P_{J,2} = 0$

Bilan des puissances : $P_{10} = P_{J,10} + P_{fer}$.

Toute l'énergie absorbée au primaire est utilisée pour compenser les pertes fer et les pertes joules au primaire.

Remarque : l'indice 0 (zéro) indique qu'il s'agit de valeurs à vide.

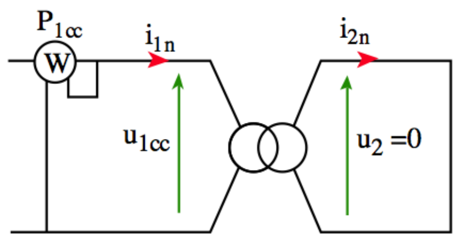
A vide I_{10} est très faible. Par conséquent $P_{J,10} \ll P_{10}$.

Finalement : essai à vide $\boxed{P_{10} = P_{fer}}$

Complément : les pertes fer dépendent essentiellement du champ magnétique donc de la tension U_1 et de la fréquence f. Comme ces deux grandeurs restent les mêmes à vide ou en charge, les pertes fer mesurées à vide sont les mêmes que celles en charge. Il faut donc naturellement faire cet essai à la tension nominale (ex. U_{1N} =220 V).

(b) Essai $\boxed{\text{en court circuit}}$: mesure des $\boxed{\text{pertes joule ("cuivre")}}$

Le circuit secondaire est en court-circuit : $U_2 = 0$ donc $P_2 = 0$



Bilan des puissances : $P_{1cc} = P_{J,1cc} + P_{J,2cc} + P_{fer}$.

Toute l'énergie absorbée au primaire est utilisée pour compenser les pertes fer et les pertes joules.

Remarque : l'indice cc indique qu'il s'agit de valeurs mesurées en court-circuit.

En court-circuit, pour obtenir In, il faut travailler à très faible tension U_{1cc}. Par conséquent P_{fer} est très faible.

Finalement : essai en court-circuit $\boxed{P_{1,cc} = P_J}$

(c) essai $\boxed{\text{en charge}}$