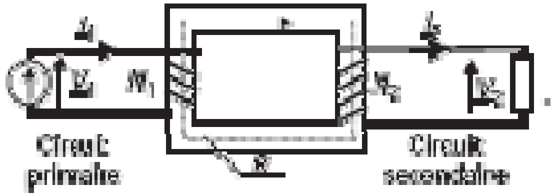
Chapitre IV: Transformateur monophasé

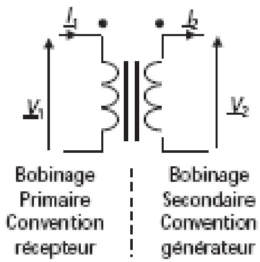
1. Présentation :

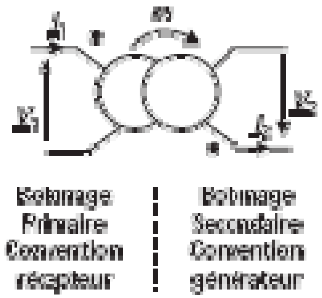
Un transformateur est un convertisseur statique, alternatif/alternatif, de l'énergie électrique. Il permet d'adapter une source à une charge. Il est constitué de deux bobinages enroulés sur le même circuit magnétique. Il peut également être utilisé comme élément isolant entre deux circuits. Il est appelé :



- Transformateur **élévateur** de tension : si V2 > V1
- Transformateur **abaisseur** de tension : si V2 < V1
- **Isolant électrique** d'une source à une charge : si V2 = V1

- **Symbolisation :** On utilise l'un des deux symboles suivants :





Chapitre IV: Transformateur monophasé

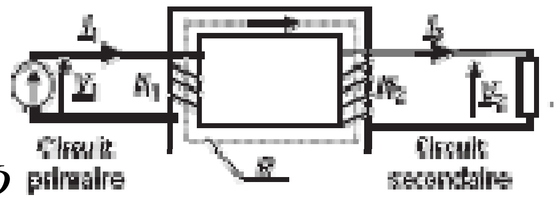
2. Principe de fonctionnement :

Les transformateurs utilisent le phénomène d'induction électromagnétique. La bobine du primaire est soumis à une tension variable.

Elle engendre un courant de même type, introduisant un champ magnétique donc à flux variable, d'où la création d'une f.e.m variable.

De plus, grâce au circuit magnétique, et en se basant sur la loi de *Faraday*, la variation du flux au primaire entraîne une variation du flux au secondaire et donc une nouvelle f.e.m induite.

3. Relations fondamentales:



3.1. Le transformateur parfait :

- D'après loi de *Faraday* : $v_1 = N_1 \dfrac{d\Phi}{dt} \quad et \quad v_2 = N_2 \dfrac{d\Phi}{dt}$

$$\Rightarrow \frac{v_2}{v_1} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = m$$

Nous appelons *''m''*, le **rapport de transformation** du transformateur.

- D'après loi de *Hopkinson* :

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = R\Phi = 0 \text{ (on suppose que } \mu = \infty)$$

Chapitre IV: Transformateur monophasé

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{m}$$

Le transformateur parfait transmet intégralement sa puissance de charge. En effet :

$$\bar{S}_1 = \bar{V}_1 \bar{I}_1^{\,*} \quad avec\ \bar{I}^* = conjugué\ de\ \bar{I}. \Rightarrow \bar{S}_1 = \left(-\frac{\bar{V}_2}{m}\right)\left(-m\bar{I}_2\right)^* = \bar{V}_2 \bar{I}_2^* = \bar{S}_2$$

Ainsi, par analogie des parties réelles et imaginaires, on notera que P1 = P2 et Q1 = Q2.
Le transformateur idéal est donc absolument passif et sans pertes. Quand il élève la tension, il abaisse le courant (ou inversement) et ne modifie pas la puissance qui transite.

Une impédance en série au primaire d'un transformateur idéal Z_1 est équivalente à l'impédance en série avec le secondaire $m^2 Z_1$ comme suit :

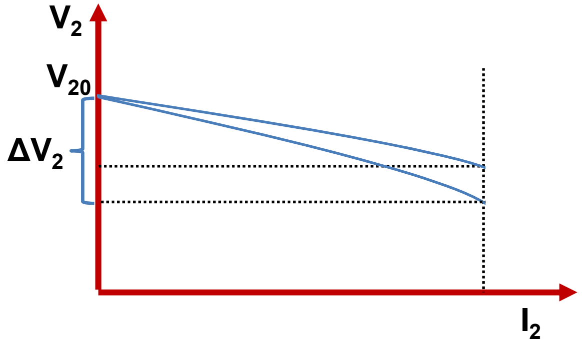
$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = \left(\frac{V_2}{m}\right)\left(\frac{1}{mI_2}\right) = \frac{1}{m^2}\frac{V_2}{I_2} = \frac{Z_2}{m^2}$$

Chapitre IV: Transformateur monophasé

3.2. Le transformateur réel:

3.2.1 La chute de tension :

Pour un transformateur réel, la tension V_2, délivrée par le secondaire varie selon la charge. En l'absence de charge, aucun courant n'est délivré par le secondaire, le transformateur fonctionne **à vide**. Nous notons $\mathbf{V_{20}}$ la tension dans ce cas, l'indice 0 est toujours utilisé pour le fonctionnement à vide.



La différence $\mathbf{\Delta V_2}$ entre la tension à vide $\mathbf{V_{20}}$ et la tension $\mathbf{V_2}$ en charge s'appelle **la chute de tension** au secondaire du transformateur. Elle dépend de la nature de la charge.

3.2.2 Le rapport de transformation :

La tension $\mathbf{V_1}$ qui alimente le primaire reste constante alors que la tension $\mathbf{V_2}$ au secondaire du transformateur diminue lorsque l'intensité du courant augmente.

Chapitre IV: Transformateur monophasé

Le rapport de transformation ne peut donc garder la même définition que pour le transformateur parfait. Nous devons choisir une tension qui reste constante, quelque soit la charge utilisée. Cette grandeur ne peut être que $\mathbf{V_{20}}$.

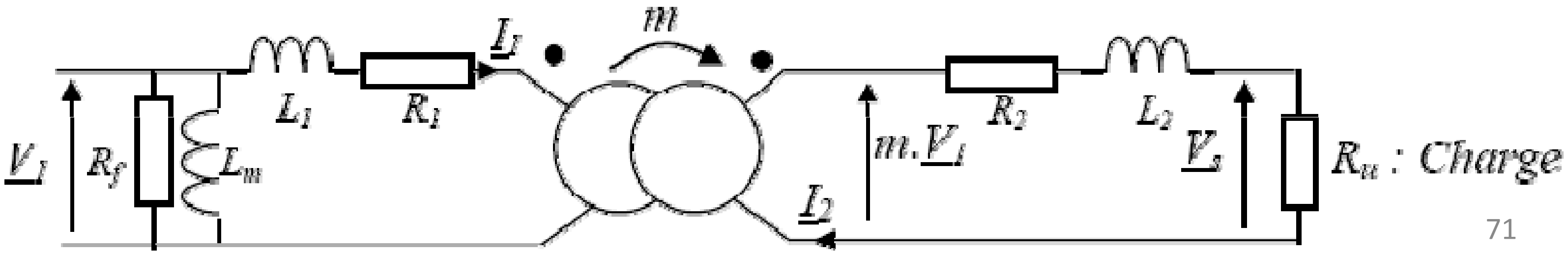
Pour cela, le rapport de transformation devient : $m = \dfrac{V_{20}}{V_1}$

3.2.3 Schéma équivalent:

Dans un transformateur réel, il faut tenir compte des éléments représentatives des bobinages primaires et secondaires. On distinguera :

- R_1 et R_2 : les résistances séries des bobinages,
- L_1 et L_2 : les inductances de fuites des bobinages,
- R_f : la résistance équivalente aux pertes fer ,
- L_m : l'inductance magnétisante du flux canalisé vue du primaire.

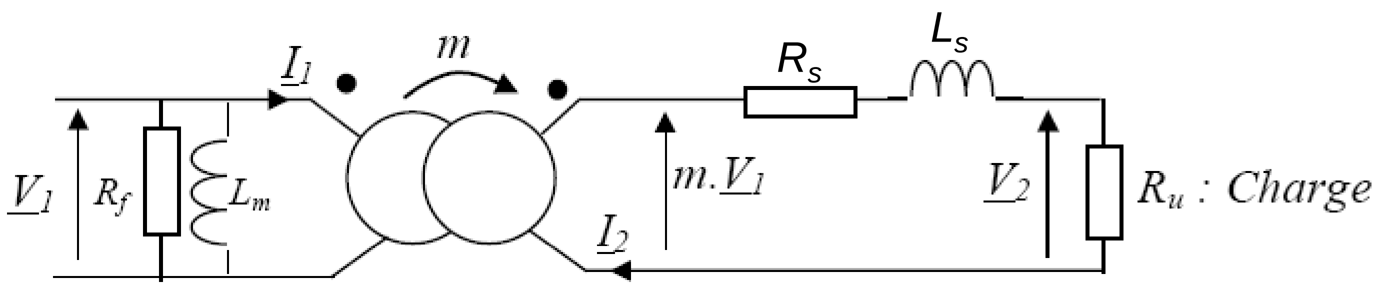
On aboutit au schéma équivalent du transformateur monophasé représenté ci dissous :



3.2.4 Schéma équivalent ramené au côté secondaire

Le schéma équivalent du transformateur décrit précédemment est lourd à manipuler et absolument inutilisable pour caractériser rapidement un transformateur. Pour cela, on simplifie ce schéma en ramenant tous les éléments du transformateur sur le circuit secondaire. Connaissant la charge, il sera aisé de calculer les paramètres électriques du transformateur complet.

En se basant à la relation entre les impédances du primaire et secondaire, on aboutit à ce schéma équivalent du transformateur monophasé ramené au côté secondaire :



avec :

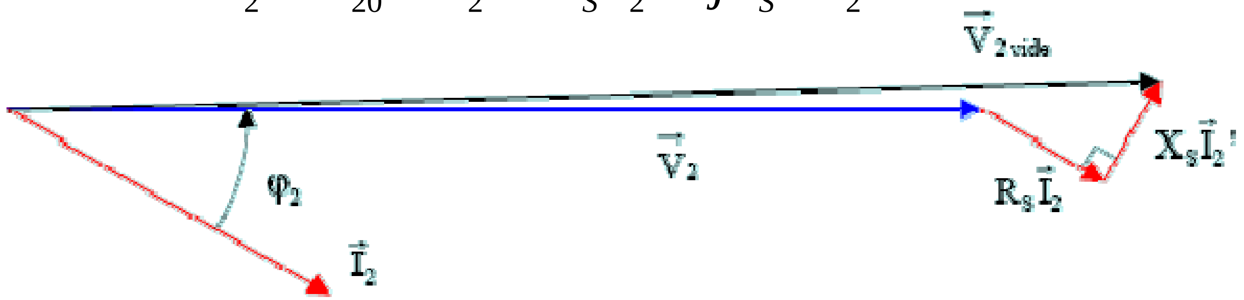
$$R_s = R_2 + m^2 R_1 \quad \text{et} \quad L_s = L_2 + m^2 L_1$$

A partir de ce schéma, on peut écrire :

$$\overline{V}_{20} = \overline{e}_2 = m\overline{V}_1$$

En appliquant la loi de maille au secondaire, la chute de tension s'exprime comme suit :

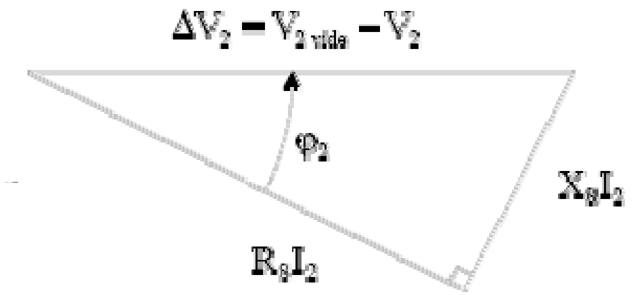
$$\Delta V_2 = \overline{V}_{20} - \overline{V}_2 = R_S\overline{I}_2 + jL_S\omega\overline{I}_2$$



En pratique : $R_S I_2 \; et \; L_S\omega I_2 \prec\prec V_2$

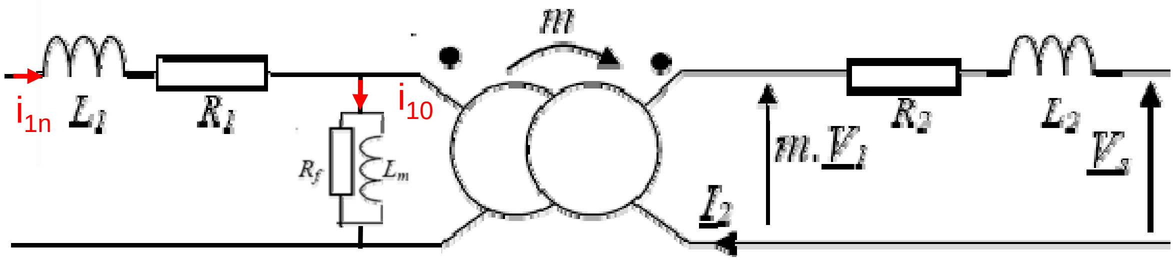
On peut faire l'approximation suivante :

$$\boxed{\Delta V_2 \approx R_S I_2 \cos\varphi_2 + L_S\omega I_2 \sin\varphi_2}$$

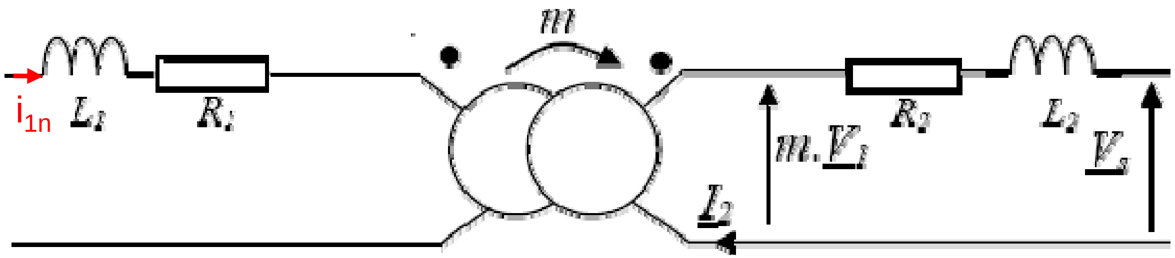


4. Hypothèse de kapp :

L'hypothèse de kapp consiste à négliger le courant i_{10} devant i_{1n}. Cela revient à négliger le courant magnétisant, les pertes par hystérésis et par courants de Foucault.



Le modèle simplifié du transformateur devient donc :



5. Bilan des puissances d'un transformateur :

5.1. Les différentes pertes :

La puissance P1 absorbée par le transformateur est plus grande que la puissance P2 restituée au secondaire, appelée également la puissance utile disponible. La différence entre ces deux grandeurs représente toutes les pertes d'un transformateur réel. Ces pertes sont :

- **Les pertes par effet joule :** les pertes par effet joule, appelées également pertes dans le cuivre, sont notées P_J. Ce sont les pertes occasionnées par le passage du courant dans les enroulements du primaire et du secondaire. Ces pertes sont proportionnelles au carré de la valeur efficace de l'intensité du courant qui traverse chaque enroulement.

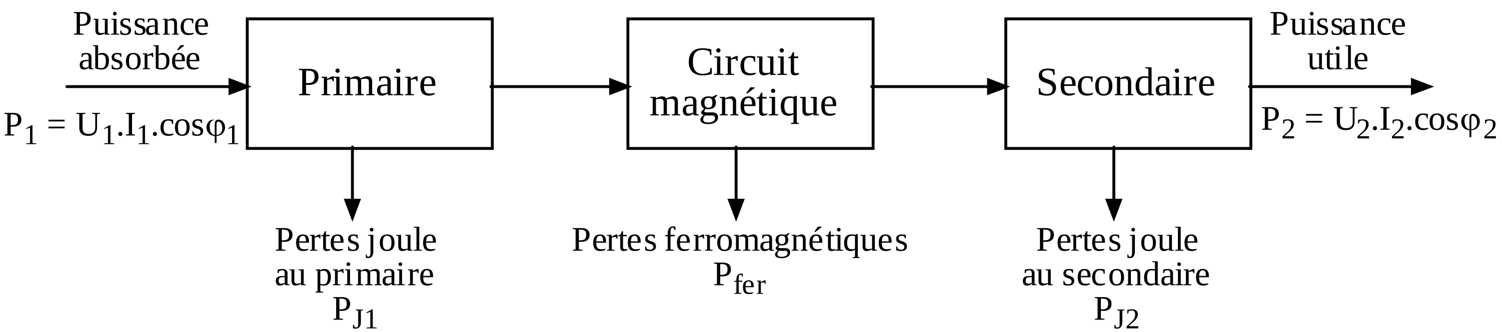
- **Les pertes fer :** elles sont appelées aussi pertes magnétiques. Ce sont les pertes dues aux fuites magnétiques, à hystérésis et au courants de Foucault.

5.2. Bilan des puissances :

Le bilan des puissances décline toutes les puissances, depuis la puissance absorbée jusqu'à la puissance utile, il prend évidemment en compte toutes les pertes.

Chapitre IV: Transformateur monophasé

Le bilan, peut être résumé à l'aide du schéma suivant :



$$P_1 = P_{J1} + P_{J2} + P_{fer} + P_2$$

Avec : $P_{fer} = \dfrac{U_1^2}{R_f}$, $P_{J1} = R_1 I_1^2$ et $P_{J2} = R_2 I_2^2$

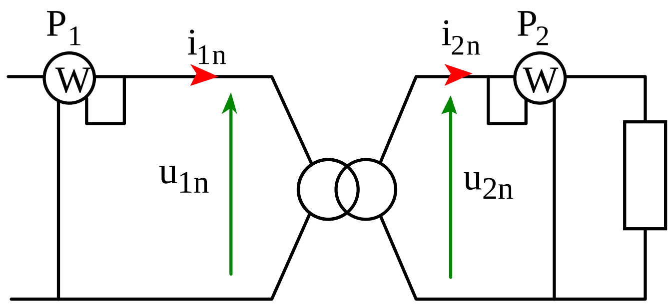
En considérant le schéma équivalent du transformateur ramené au côté secondaire, les pertes joules seront mesurées comme suit :

$$P_J = P_{J1} + P_{J2} = R_s I_2^2$$

5.3. Rendement du transformateur :

- **Méthode directe :** Cette méthode consiste à mesurer avec deux wattmètres P_1 et P_2.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$



Cette méthode ne permet pas d'avoir une bonne précision sur la détermination du rendement du fait que 95% < η< 99%. On préfère souvent utiliser la méthode des pertes séparées.

- **Méthode des pertes séparées :** On mesure P_2 , les pertes fer et les pertes joules.

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{fer} + P_J} = \frac{U_2 I_2 \cos\varphi_2}{U_2 I_2 \cos\varphi_2 + P_{fer} + P_J}$$

Le rendement est maximal à (P_{fer}+P_J) minimum. Par conséquent cette somme est minimale si seulement si $P_{fer} = P_J$

Chapitre IV: Transformateur monophasé

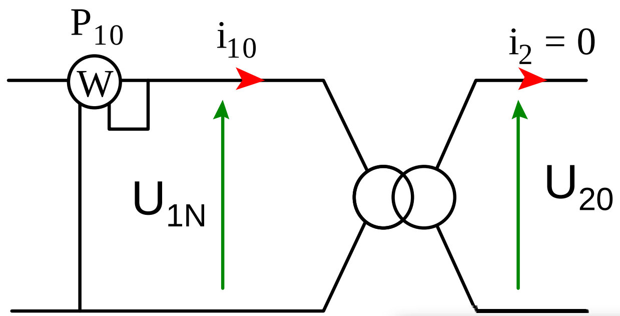
6. Détermination des paramètres du schéma équivalent :

La prédétermination du comportement en charge d'un transformateur peut se faire à condition de connaître les paramètres de son schéma équivalent. Ces paramètres peuvent être déterminés au moyen de deux essais : un essai à vide et un essai en court-circuit.

6.1. L'essai à vide:

On alimente le primaire sous sa tension nominale U_{10}=U_{1N}. L'intensité du courant au secondaire est nulle, la puissance délivrée par le secondaire donc P_2 est également nulle.

$$P_{10} = P_J + P_{fer} + P_2 \quad \text{or} \quad P_J = R_s I_2^2 = 0 \quad \text{et} \quad P_2 = 0$$



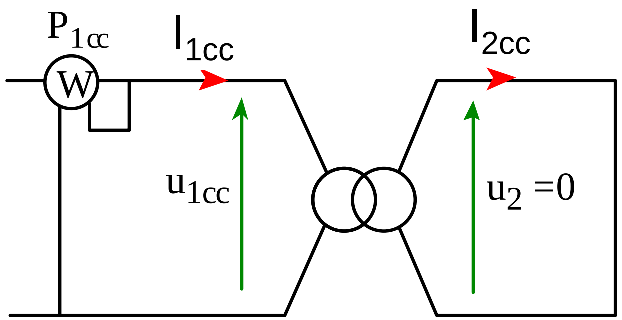
$$\Rightarrow \boxed{P_{10} = P_{fer}} \quad \Rightarrow \boxed{R_f = \frac{U_{10}^2}{P_{10}}}$$

$$Q_{10} = l_1 \omega I_{10}^2 + l_2 \omega I_2^2 + \frac{U_{10}^2}{L_m \omega} \quad \text{or} \quad I_{10} \prec\prec I_{1N} \ (10\% I_{1N}) \quad et \quad I_2 = 0 \quad \Rightarrow \boxed{L_m \omega = \frac{U_{10}^2}{Q_{10}}}$$

6.2. L'essai en court-circuit :

On court-circuite le secondaire du transformateur. La valeur efficace U_{1cc} de tension primaire est réduite à une valeur comprise entre 5 et 10% de sa valeur nominale U_{1N} alors que le courant dans le secondaire I_{2cc} égal à I_{2N}. La tension au secondaire est nulle du fait du court-circuit, la puissance P_2 délivrée par le secondaire est donc également nulle.

$P_{1cc} = P_J + P_{fer} + P_2$ or $P_J = R_s I_{2cc}^2$ et $P_2 = 0$



Or, en considérant l'hypothèse de kapp, le courant i_{10} est négligé devant i_{1n}. La tension U_{1cc} est réduite devant U_{1N} . Cela revient à négliger les pertes fer.

$$\Rightarrow \boxed{P_{1cc} = P_J} \Rightarrow \boxed{R_s = \frac{P_{1cc}}{I_{2cc}^2}}$$

$$Q_{1cc} = L_s \omega I_{2cc}^2 = X_s I_{2cc}^2 \Rightarrow \boxed{X_s = \frac{Q_{1cc}}{I_{2cc}^2}}$$

En court-circuit, la tension aux bornes de l'impédance secondaire est de la forme :

$$e_{2cc} = Z_s I_{2cc}$$

avec $Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2}$

$$\Rightarrow \quad Z_s = \frac{mU_{1cc}}{I_{2cc}}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{X_s = \sqrt{\left(\frac{mU_{1cc}}{I_{2cc}}\right)^2 - R_s^2}}$$