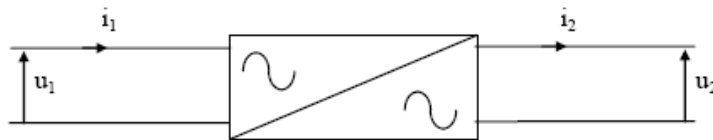


## Chapitre 4

# LE TRANSFORMATEUR MONOPHASE EN REGIME SINUSOÏDAL

### I FONCTION DU TRANSFORMATEUR :

Le transformateur est un convertisseur d'énergie réversible. Il transfère, en alternatif, une puissance électrique d'une source à une charge, sans changer la fréquence, mais en adaptant la valeur de la tension ( ou du courant ) au récepteur.



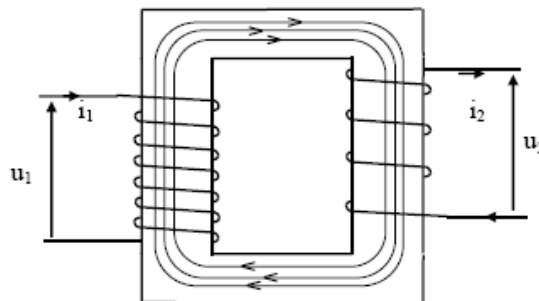
**Remarque :** si  $U_1$  et  $U_2$  sont les *valeurs efficaces* de  $u_1$  et  $u_2$  :

- Si  $U_2 > U_1$ , le transformateur est *élévateur de tension*.
- Si  $U_2 < U_1$ , le transformateur est *abaisseur de tension*.
- Si  $U_2 = U_1$ , le transformateur assure l'*isolation galvanique* entre la source et le charge.

### II PRESENTATION DU TRANSFORMATEUR :

#### 1- Description et symboles :

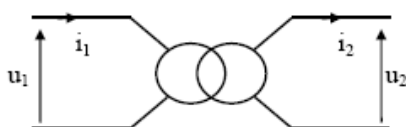
Le transformateur monophasé est constitué d'un circuit magnétique fermé sur lequel on a bobiné deux enroulements électriquement indépendants.



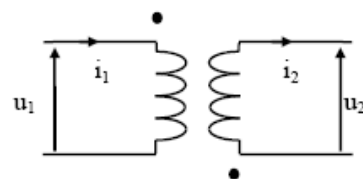
L'enroulement du primaire comporte  $N_1$  spires et l'indice '1' est affecté pour toutes les grandeurs du primaire.

L'enroulement du secondaire comporte  $N_2$  spires et l'indice '2' est affecté pour toutes les grandeurs du secondaire.

Symbole :



OU



**Conventions :** On adopte la convention récepteur pour le circuit primaire ( qui reçoit la puissance de la source ).  
la convention générateur pour le circuit secondaire.

Bornes homologues '●' sont des bornes par lesquelles les courants  $i_1$  et  $i_2$  entrent de manière à créer des flux qui s'additionnent.

### III MODELE EQUIVALENT DU TRANSFORMATEUR PARFAIT :

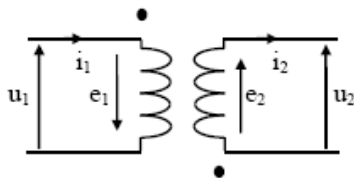
#### 1- Définition :

Un transformateur est parfait lorsqu'il ne provoque aucune perte d'énergie ce qui implique les trois conditions suivantes :

- Il n'y a pas de pertes par effet Joule ( la résistance  $R_1$  et  $R_2$  des enroulement est nulle ).
- Il n'y a pas de pertes dans le circuit magnétique, donc ni hystérésis ni courants de Foucault.
- Il n'y a pas de fuites magnétique ( toutes les lignes de champ sont canalisées dans le circuit magnétique ).

#### 2- Propriétés du transformateur parfait :

##### 2.1- Existence des f.e.m. induites :



*Rappel :* Loi de **FARADAY** - f.e.m. induite.

Dans tout circuit électrique soumis à une variation de flux magnétique il se crée une f.e.m. induite qui a pour expression :

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

La f.e.m. induite aux bornes de la bobine du primaire vaut :  $e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt}$ .

La f.e.m. induite aux bornes de la bobine du secondaire vaut :  $e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$

On peut donc en déduire une relation qui lie  $e_1$ ,  $e_2$ ,  $N_1$  et  $N_2$  :

$$\frac{d\phi}{dt} = -\frac{e_1}{N_1} \text{ et } \frac{d\phi}{dt} = -\frac{e_2}{N_2} \text{ soit } -\frac{e_1}{N_1} = -\frac{e_2}{N_2} \text{ d'où}$$

$$\frac{e_2}{e_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

##### 2.2- Relation entre les tensions :

Comme les grandeur  $u_1$  et  $u_2$  sont des grandeurs sinusoïdales, on note  $\underline{U}_1$ ,  $\underline{U}_2$ ,  $\underline{E}_1$  et  $\underline{E}_2$  les grandeurs complexes soit :

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 \text{ et } \underline{U}_2 = \underline{E}_2 \text{ d'où } \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = -\frac{\underline{E}_2}{\underline{E}_1} = -\frac{N_2}{N_1} = -\underline{m} \text{ avec } \underline{m} : \text{ rapport de transformation.}$$

En utilisant les valeurs efficaces, on peut aussi écrire que  $\underline{m} = \frac{U_2}{U_1}$ .

##### 2.3- Relation entre les courants :

Comme le circuit magnétique est supposé parfait, sa réluctance  $R$  est nulle donc si on applique le théorème d'Ampère qui est :  $\sum N.I = \mathfrak{R}\Phi$  d'où :

$$N_1 \cdot \underline{I}_1 + N_2 \cdot \underline{I}_2 = 0 \text{ soit}$$

$$\underline{I}_1 = -\frac{N_2}{N_1} \cdot \underline{I}_2 \text{ ou encore } \underline{I}_1 = -\underline{m} \cdot \underline{I}_2$$

En utilisant les grandeurs efficaces, on a la relation :  $I_1 = \underline{m} \cdot I_2$

2.4- Formule de BOUCHEROT :

Soient :  $S$  : l'aire de la section droite du circuit magnétique en  $m^2$

$N_1$  : le nombre de spires de la bobine du primaire.

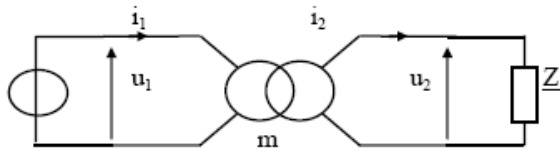
$\widehat{B}$  : la valeur maximale du module du champ magnétique dans le circuit magnétique en Tesla ( T )

$f$  : la fréquence en Hertz ( Hz ).

Connaissant ces quatre grandeurs, on peut en déduire  $E_1$  :  
de même que  $E_2$  :

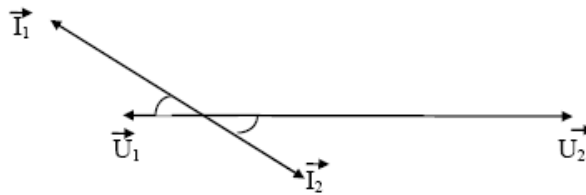
$$\begin{aligned} E_1 &= 4,44 S.N_1. \widehat{B}.f. \\ E_2 &= 4,44 S.N_2. \widehat{B}.f. \end{aligned}$$

2.5- Diagramme de FRESNEL :



Lorsque l'on branche une charge au secondaire d'un transformateur, c'est celle-ci qui va imposer le courant  $\underline{I}_2$  et donc le courant  $\underline{I}_1$  et aussi le déphasage  $\varphi$ .

La charge va imposer un déphasage  $\varphi_2$  entre les grandeurs  $\underline{I}_2$  et  $\underline{U}_2$  et en utilisant les relations suivantes :  
 $\underline{I}_1 = -m.\underline{I}_2$  et  $\underline{U}_2 = -m\underline{U}_1$  on obtient le diagramme de FRESNEL :



2.5- Relation entre les puissances :

- Puissance apparente :  $S_1 = U_1.I_1 = \frac{U_2}{m}.mI_2 = U_2.I_2 = S_2$
- Puissance active ( avec  $\varphi_1 = \varphi_2$  ) :  $P_1 = U_1.I_1. \cos \varphi_1 = S_1. \cos \varphi_1 = S_2. \cos \varphi_2 = P_2$
- Puissance réactive :  $Q_1 = U_1.I_1. \sin \varphi_1 = S_1. \sin \varphi_1 = S_2. \sin \varphi_2 = Q_2$
- En conclusion, il y a transfert de toutes les puissances du primaire vers le secondaire.

3- Modèle équivalent vue de la source :

Il s'agit de déterminer ce que ' voit ' le primaire d'un transformateur lorsque l'on branche une charge  $\underline{Z}$  aux bornes du secondaire et de déterminer un modèle ne comportant plus que la source de tension  $\underline{U}_1$  et l'impédance ramenée au primaire.

Pour cela, on va utiliser les relations déterminées précédemment :

$$\underline{U}_2 = -m\underline{U}_1 \quad (1)$$

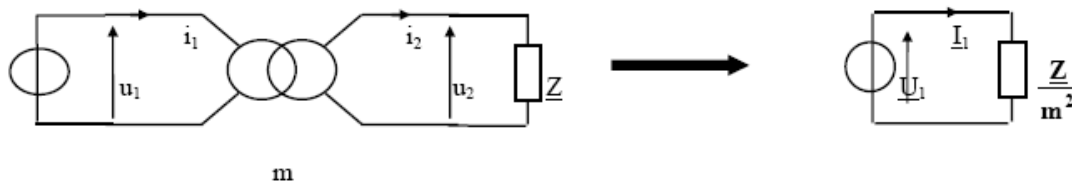
$$\underline{U}_2 = \underline{Z}. \underline{I}_2 \quad (2)$$

$$\underline{I}_1 = -m.\underline{I}_2 \quad (3)$$

De l'équation ( 2 ), on en déduit que  $\underline{Z} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2} = \frac{-m.\underline{U}_1}{-\frac{\underline{I}_1}{m}} = m^2 . \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1}$

Relation ( 3 )

D'où le modèle équivalent vu du primaire :



#### 4- Intérêt du transformateur parfait :

C'est un modèle très important et, dans la plupart des applications, le comportement du transformateur réel sera très proche de celui du transformateur parfait.

### IV LE TRANSFORMATEUR REEL :

#### 1- Plaque signalétique du transformateur :

Selon la norme NFC 15.100, elle indique :

- La valeur de la puissance apparente nominale :  $S_N = S_1 = S_2$ .
- La tension d'alimentation  $U_1$  du primaire.
- La tension à vide du secondaire  $U_{2v}$ .
- La fréquence d'utilisation  $f$ .

Exemple : la plaque signalétique comporte les indications suivantes : 600 VA ; 220 V ; 24 V et 50 Hz. Ces indications permettent de calculer :

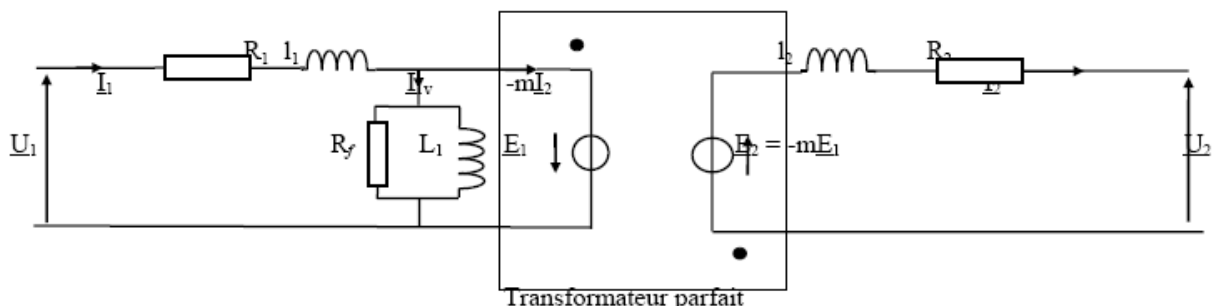
- le rapport de transformation  $m = \frac{U_{2v}}{U_1} = \frac{24}{220} = 0,11$ .

- les grandeurs nominales des courants  $I_{1N} = \frac{S_N}{U_1} = \frac{600}{220} = 2,7A$  et  $I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2v}} = \frac{600}{24} = 25A$ .

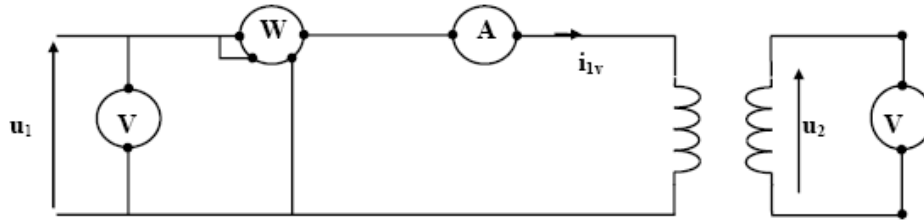
#### 2- Les différentes pertes du transformateur :

- Pertes par effet Joule ou pertes dans le cuivre dues à la résistance  $R_1$  et  $R_2$  des enroulements du primaire et du secondaire.
- Pertes magnétiques ou pertes dans le fer qui sont dues aux pertes par hystérésis et aux pertes dues aux courants de Foucault. Ces pertes dépendent de la fréquence  $f$  d'utilisation et de la valeur maximale du champ magnétique. Si la tension efficace au primaire est constante, les pertes dans le fer sont constantes. Elle ne dépendent pas du fonctionnement du transformateur.

#### 3- Modèle électrique du transformateur réel :



4- Essai à vide du transformateur réel :



Remarque : le courant  $i_{1v}$  n'étant pas sinusoïdal, il faut utiliser un ampèremètre TRMS.

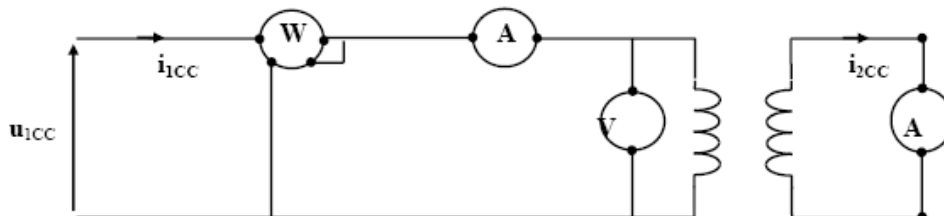
4.1- Détermination du rapport de transformation  $m$  :  $m = \frac{U_{2v}}{U_1}$

4.2- L'essai à vide sous tension nominale  $U_{1N}$  permet de déterminer les pertes dans le fer.

$$P_{1v} = P_f + R_1 \cdot I_{1v}^2 \approx P_f$$

4.3- Si la valeur efficace  $U_1$  varie, on démontre que les pertes dans le fer sont proportionnelles au carré de  $U_1$  soit :  $P_f = k \cdot U_1^2$ .

5- Essai en court - circuit :



Cet essai se fait sous tension au primaire réduite c'est - à - dire que l'on règle la tension  $u_1$  jusqu'à ce la valeur efficace du courant  $i_2$  soit celui du courant  $I_{2N}$ .

$$P_{1cc} = P_{fcc} + P_{jcc}$$

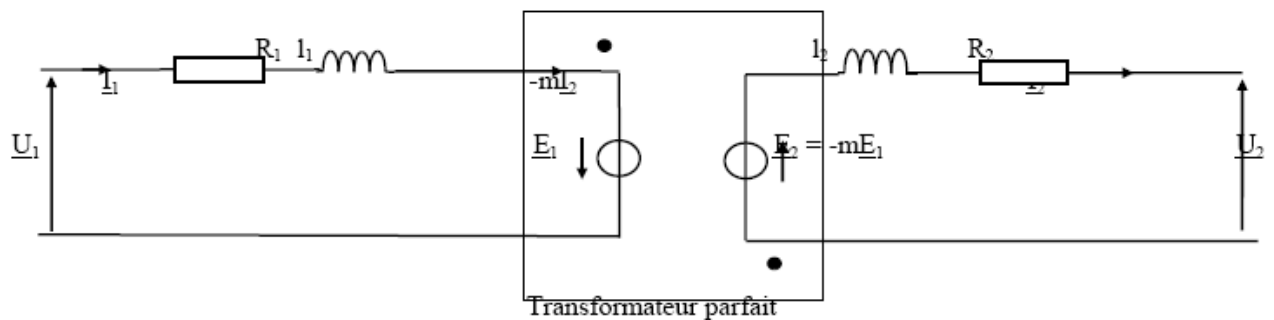
or cet essai se fait sous tension au primaire réduite donc les perte dans le fer sont négligeables ce qui signifie que les pertes qu'on mesure sont **les pertes par effet Joule** ou *perles dans le cuivre* d'où :

$$P_{1cc} = P_{jcc}$$

**IV MODELE EQUIVALENT DE THEVENIN :**

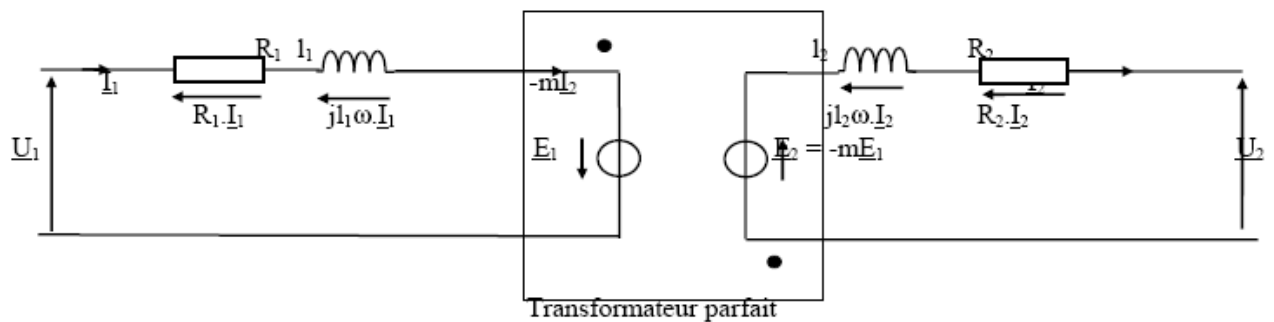
1- Hypothèse de KAPP :

L'hypothèse de KAPP consiste à négliger le courant à vide  $i_{1v}$  donc de considérer que le circuit magnétique est parfait ce qui donne un nouveau schéma électrique du transformateur :

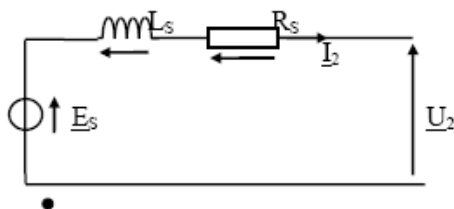


## 2- Modèle équivalent de THEVENIN dans l'approximation de KAPP :

Le modèle de Thévenin a pour but de transformer ce modèle : (Modèle n°1)



en celui-ci : (modèle n°2)



## 3- Détermination des éléments du modèle de THEVENIN :

A partir du modèle n°1 :

En appliquant la loi des mailles au primaire, on trouve :

$$\underline{E}_1 = -\underline{U}_1 + R_1 \cdot \underline{I}_1 + j\omega L_1 \cdot \underline{I}_1$$

On multiplie les deux membres de cette égalité par le rapport de transformation (- m) :

$$-m\underline{E}_1 = m\underline{U}_1 - mR_1 \cdot \underline{I}_1 - j\omega m L_1 \cdot \underline{I}_1$$

On remplace  $\underline{I}_1$  par  $\underline{I}_1 = -m \underline{I}_2$  : soit

$$-m\underline{E}_1 = m\underline{U}_1 + m^2 R_1 \cdot \underline{I}_2 + j\omega m^2 L_1 \cdot \underline{I}_2 \quad (A)$$

Maintenant, on applique la loi des mailles au secondaire :

$$\underline{E}_2 = \underline{U}_2 + R_2 \cdot \underline{I}_2 + j\omega L_2 \cdot \underline{I}_2 \quad (B)$$

Ajoutons membre à membre les équations (A) et (B) :

$$-m\underline{E}_1 + \underline{E}_2 = m\underline{U}_1 + \underline{U}_2 + (m^2 R_1 + R_2) \cdot \underline{I}_2 + j\omega (m^2 L_1 + L_2) \cdot \underline{I}_2 \quad (C)$$

En utilisant les relations suivantes :

$$\underline{E}_2 = m\underline{E}_1 \text{ et } \underline{U}_{2v} = -m\underline{U}_1$$

l'équation ( C ) devient :

$$0 = -\underline{U}_{2v} + \underline{U}_2 + (m^2 R_1 + R_2) \cdot \underline{I}_2 + j\omega(m^2 l_1 + l_2) \cdot \underline{I}_2 \quad ( C )$$

En posant :

$$m^2 R_1 + R_2 = R_s \quad ; \quad m^2 l_1 + l_2 = L_s \text{ et } X_s = L_s \omega$$

l'équation ( C ) devient :

$$\underline{U}_{2v} = \underline{U}_2 + R_s \cdot \underline{I}_2 + jX_s \cdot \underline{I}_2$$

En identifiant cette équation avec celle du modèle de Thévenin, on obtient :

$$\underline{E}_s = \underline{U}_{2v}$$

$$\underline{Z}_s = R_s + jX_s$$

#### 4- Détermination expérimentale des éléments du modèle de Thévenin :

- La f.e.m.  $E_v$  lors de l'essai à vide lorsque le primaire est sous tension  $U_1$ .

$$E_{2v} = mU_1$$

- Le module de l'impédance  $Z_s$  est déterminé lors de l'essai en court - circuit :

$$Z_s = m^2 \frac{U_{1CC}}{I_{1CC}}$$

$$R_s = \frac{P_{1CC}}{I_{2CC}^2} = m^2 \frac{P_{1CC}}{I_{1CC}^2}$$

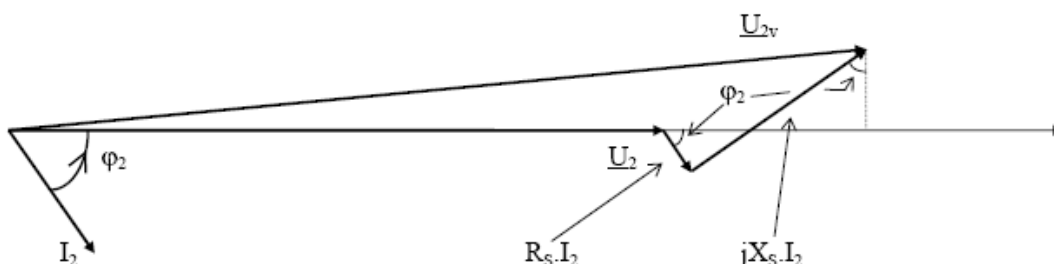
$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2}$$

#### 5- Diagramme de KAPP :

Lorsque l'on branche une charge au secondaire d'un transformateur, celle - ci va alors un déphasage  $\varphi(\underline{I}_2, \underline{U}_2)$ .

En utilisant la relation établit précédemment :

$$\underline{U}_{2v} = \underline{U}_2 + R_s \cdot \underline{I}_2 + jX_s \cdot \underline{I}_2$$



On peut, à partir de ce diagramme déterminer la chute de tension  $\Delta U_2 = U_{2v} - U_2$  soit

$$\Delta U_2 = R_s \cdot I_2 \cos \varphi_2 + X_s \cdot I_2 \sin \varphi_2$$

6- Rendement du transformateur :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_f + P_j}$$

7- Rôle des transformateurs dans la distribution de l'énergie électrique :

Dans les centrales, on produit l'énergie électrique en moyenne tension ( de 15 kV à 20 kV ). Pour limiter les pertes dans les fils de ligne, le transport s'effectue en haute et très haute tension ( jusqu'à 400 kV ).

Les transformateurs permettent d'effectuer les adaptations de tensions nécessaires à la distribution de l'énergie électrique avec un très bon rendement, supérieur à 99%.