

# CHAPITRE 5

Année universitaire  
2024/2025

## Les transformateurs électriques (L'essentiel du cours)

Electrotechnique Fondamentale 1

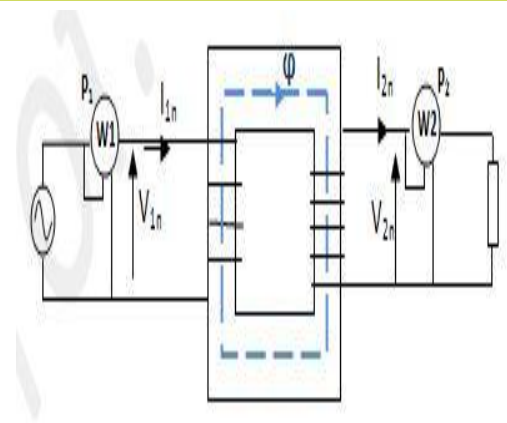
2<sup>eme</sup> année License tronc commun ST

Filières Génie électrique

**Prof. Megherbi Ahmed chaouki**  
Chargé de Cours

Département de Génie électrique

Université Mohammed Khider Biskra



### Contenu du chapitre 5

Ce chapitre couvre les points suivants :

- Constitution d'un transformateur et principe de fonctionnement
- Le rapport de transformation
- Le transformateur idéal et le transformateur réel
- Bilan énergétique (puissance)
- Le rendement d'un transformateur réel

# Chapitre V

## Transformateurs électriques

### V.1.Introduction

Les transformateurs sont des systèmes de conversion électriques statiques qui modifient les valeurs efficaces des grandeurs électriques (courant et tension) sans modifier la fréquence afin d'assurer une bonne adaptation d'alimentation pour les systèmes électriques.

Les transformateurs jouent un rôle primordial dans le transport d'énergie électrique avec un minimum de pertes via le réseau électrique. Le transport de cette énergie se fait donc à haute tension ainsi Ils assurent l'élévation de la tension à la sortie de la centrale de production de l'énergie électrique, puis un abaissement de cette tension du réseau pour une exploitation par les consommateurs de cette énergie.

### V.2. Schéma et constitution d'un transformateur

Un transformateur est constitué de deux circuits (fig.5.1) :

Un **circuit électrique** formé de deux enroulements (bobines) ; l'un est appelé **primaire** de  $N_1$  spires qui reçoit l'énergie électrique, l'autre **secondaire** de  $N_2$  spires qui fournit cette énergie à la charge.

Un **circuit magnétique** fermé, à la base d'un matériau ferromagnétique de grande perméabilité.

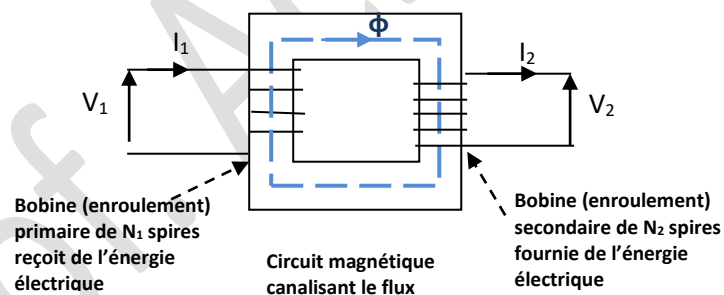


Fig.5.1 Schéma de constitution d'un transformateur

$V_1$ ,  $V_2$ ,  $I_1$  et  $I_2$  sont les tensions et courants respectivement du primaire et du secondaire. Les enroulements sont isolés électriquement et sont couplés par le flux magnétique  $\phi$ .

### V.3. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un transformateur s'articule sur la loi de Faraday qui s'énonce qu'une variation de flux à travers la surface d'une spire crée une force électromotrice f.e.m  $e(t)$  :

$$e(t) = -\frac{d\phi}{dt}$$

En effet, le primaire est alimenté par une tension sinusoïdale va créer un flux magnétique lui-même sinusoïdal qui traversant l'enroulement secondaire va induire une f.e.m  $e(t)$  : donc au niveau des bornes du secondaire, apparaît alors une tension sinusoïdale de même nature que celle de la tension appliquée au primaire, mais avec une valeur efficace modifiée.

#### V.4. Convention générateur et récepteur dans un transformateur

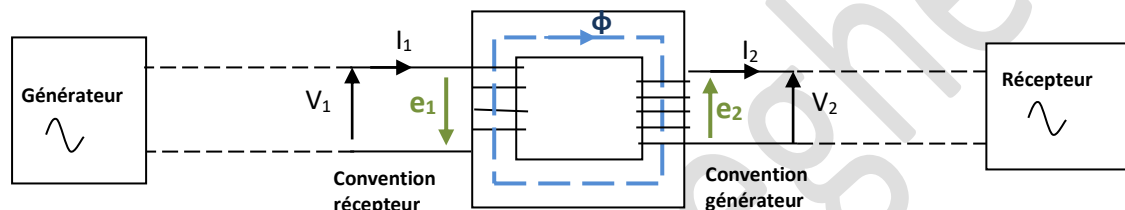


Fig. 5.2. Convention dans un transformateur

Selon la figure 5.2. L'enroulement primaire se comporte comme un récepteur :  $V_1$  et  $I_1$  sont donc liés par la convention des récepteurs (sont en opposition de sens).

$$V_1(t) = -e_1(t)$$

Pour l'enroulement secondaire la convention générateur est adoptée et il fournit de l'énergie au récepteur.

$$V_2(t) = e_2(t)$$

#### V.5. Les symboles électriques

Dans les schémas électriques on peut rencontrer l'un des deux symboles de la figure 5.4 représentant un transformateur monophasé.

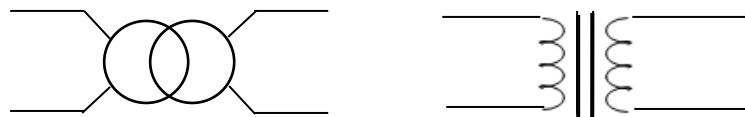


Fig. 5.4 Symboles électriques du transformateur

### V.6. Transformateur idéal :

Un transformateur idéal (appeler aussi **transformateur parfait**) ne présente aucune perte de puissance (de point de vue puissance  $\sum \text{pertes dans le transformateur} = 0$ ), cela se traduit par l'établissement des hypothèses suivantes :

- Résistances des enroulements primaires et secondaires sont nulles (pas d'effet Joule).
- Un couplément parfait des enroulements primaire et secondaire
- Le circuit magnétique étant parfait (la perméabilité relative du matériau ferromagnétique  $\mu_r$  est infinie et les pertes fer nulles).

### V.7. Le rapport de transformation

Le transformateur est caractérisé par son rapport de transformation ( $m$ ) défini par la relation suivante :

$$m = \frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

Ainsi, on peut distinguer que pour :

- $m > 1 \Rightarrow V_2 > V_1$  C'est un **Transformateur élévateur de tension, abaisseur de courant.**
- $m < 1 \Rightarrow V_2 < V_1$  C'est un **Transformateur abaisseur de tension, élévateur de courant.**
- $m = 1 \Rightarrow V_2 = V_1$  C'est un **Transformateur d'isolement.**

### V.8. Equations de fonctionnement

#### V.8.1. Expressions des f.é.m. induites dans un transformateur parfait :

Les forces électromotrices induites  $e_1(t)$  et  $e_2(t)$  dépendent de la variation du flux  $\varphi(t)$ , ainsi d'après la loi de Faraday :

$$\begin{cases} e_1(t) = -N_1 \frac{d\varphi}{dt} \\ e_2(t) = -N_2 \frac{d\varphi}{dt} \end{cases}$$

#### V.8.2. Relation entre les tensions dans le cas parfait

Dans le cas d'un transformateur parfait la tension primaire et secondaire vérifie les relations suivantes :

$$\begin{cases} v_1 = -e_1(t) = N_1 \frac{d\varphi}{dt} & (5.1) \\ v_2 = e_2(t) = -N_2 \frac{d\varphi}{dt} & (5.2) \end{cases}$$

Le rapport des équations (5.2) et (5.1) donne :

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

On peut écrire aussi :

$$v_2 = -m v_1 \quad (5.3)$$

Les tensions  $v_1$  et  $v_2$  sont en opposition de phase.

### V.8.3. Relation sur les courants

Selon la loi de Hopkinson, dans un circuit magnétique fermé avec deux bobines parcourus par les courants  $i_1$  et  $i_2$  on a :

$$N_1 i_1 + N_2 i_2 = \mathcal{R} \varphi \quad (5.4)$$

D'après les hypothèses d'un transformateur parfait, le circuit magnétique étant idéal ( $\mu_r$  tend vers l'infini) ce qui se traduit par une réluctance du circuit magnétique nulle ( $\mathcal{R} = 0$ )

L'équation précédente (5.4) s'écrit sous la forme :

$$N_1 i_1 + N_2 i_2 = 0$$

Ce qui implique :  $\frac{i_1}{i_2} = -\frac{N_2}{N_1} = -m$

### Remarque :

Pour le calcul du rapport de transformation  $m$  à base des courant primaire et secondaire, c'est l'inverse de celui des tensions : en valeur efficace des courants le rapport de transformation s'écrit :

$$m = \frac{I_1}{I_2}$$

### V.9. Diagramme de Fresnel

On va représenter les tensions  $v_1$  et  $v_2$  dans un diagramme vectoriel, en prenant comme grandeurs de référence les tensions  $v$

La figure 5.5 représente le diagramme de Fresnel des différentes grandeurs électriques des enroulements primaires et secondaire d'un transformateur parfait.

Les vecteurs  $V_1$  et  $V_2$  sont alignés et il en va de même pour les vecteurs courants  $I_1$  et  $I_2$ .

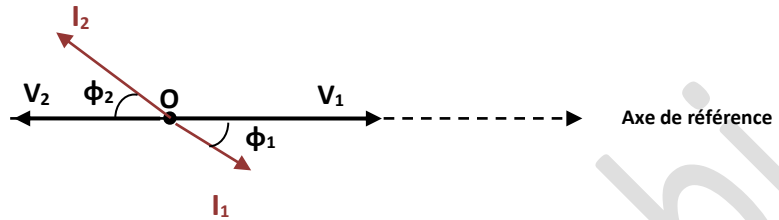


Fig. 5.5. Diagramme de Fresnel dans le cas d'un transformateur parfait

D'après la figure 5.5 on peut déduire que pour un transformateur parfait les déphasages  $\phi_1$  et  $\phi_2$  sont les mêmes ainsi :  $\phi_1 = \phi_2$

### V.10. Relation de Boucherot

La tension d'alimentation appliquée au primaire du transformateur est sinusoïdale, alors le flux magnétique est aussi sinusoïdal (de même pour l'induction magnétique  $B$ ).

On considère le flux magnétique comme référence donc :  $b(t) = B_{max} \sin(\omega t)$

De l'équation (5.1) :  $v_1 = -e_1(t) = N_1 \frac{d\phi}{dt}$

$\phi(t) = b(t) S$  où  $S$  est la section du circuit magnétique

$\phi(t) = B_{max} S \sin(\omega t)$

La tension au primaire vaut :

$$\begin{aligned} v_1 &= N_1 \frac{d(B_{max} S \sin(\omega t))}{dt} \\ v_1 &= N_1 B_{max} S \frac{d(\sin(\omega t))}{dt} \\ v_1 &= N_1 B_{max} S \omega \cos(\omega t) \\ v_1 &= N_1 B_{max} S \omega \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (5.5)$$

La tension  $v_1(t)$  est en avance de  $\frac{\pi}{2}$  par rapport au flux magnétique  $\phi(t)$ .

Le terme  $(N_1 B_{max} S \omega)$  de l'expression de la tension  $v_1(t)$  représente la tension Maximale  $V_{1max}$

$$V_{1max} = V_1 \sqrt{2} = (N_1 B_{max} S \omega)$$

$V_1$  la valeur efficace de la tension instantanée  $v_1(t)$ ,  $\omega = 2\pi f$

Donc : 
$$V_1 = \frac{2\pi f N_1 B_{max} S}{\sqrt{2}}$$

On obtient l'expression de la valeur efficace  $V_1$  :

$$V_1 = 4.44 N_1 f B_{max} S$$

C'est la **formule de Boucherot**

Le flux maximal  $\varphi_{max}$ , le champ magnétique maximal  $B_{max}$  et la section droite  $S$  du circuit magnétique sont reliés par la relation  $\varphi_{max} = B_{max} S$

La relation de Boucherot peut s'écrire aussi :

$$V_1 = 4.44 N_1 f \varphi_{max}$$

### V.11. Bilan de puissance (lois de conservation)

Dans un transformateur parfait les différentes puissances se conservent (toutes les pertes sont négligées dans ce transformateur). Il conserve aussi le déphasage, cela se traduit par les relations suivantes :

La puissance apparente :

$$S_1 = S_2 \Leftrightarrow V_1 I_1 = V_2 I_2$$

La puissance active

$$P_1 = P_2$$

La puissance réactive

$$Q_1 = Q_2$$

Les puissances absorbées par le transformateur au niveau de l'enroulement primaire sont totalement fournies à la charge connectée à l'enroulement secondaire (perte joules et perte fer sont nulles dans ce transformateur).

Le rendement d'un transformateur parfait est égal à 1.

### V.12. Le transformateur réel

Dans un transformateur réel on tient compte des pertes de puissance ( $\sum \text{pertes} \neq 0$ )

### V.13. Bilan énergétique (puissance) dans un transformateur réel

La puissance demandée par le transformateur au primaire va être en partie dissipée sous forme de chaleur dans le transfo (pertes cuivre et pertes fer) et fournie à la charge depuis le secondaire comme le montre le bilan de puissance dans la figure ci-dessous

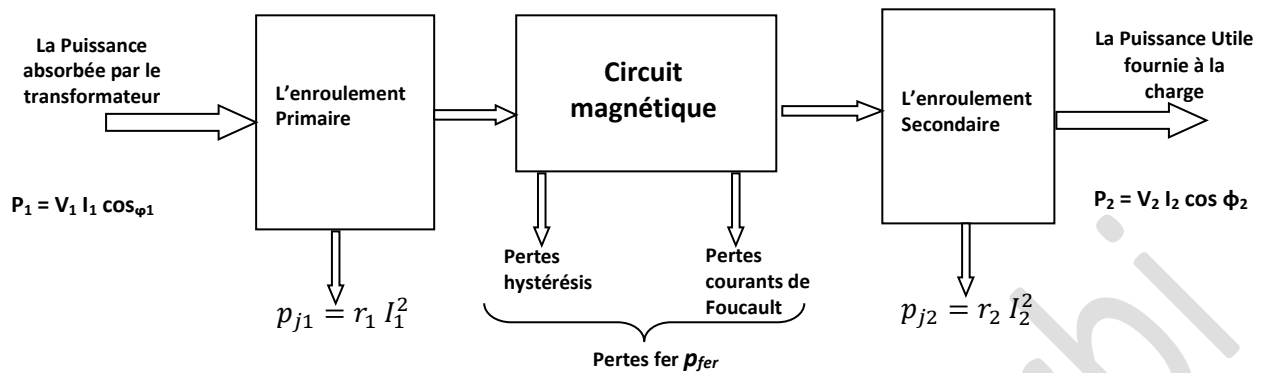


Fig.5.6. Bilan de puissance dans un transformateur réel

$p_{j1}$  les pertes joules dans l'enroulement primaire de résistance  $r_1$ ,

$p_{j2}$  les pertes joules dans l'enroulement secondaire de résistance  $r_2$ ,

Les pertes cuivre est la somme des pertes joules dans les enroulements primaire et secondaire :

$$p_{cuivre} = p_{j1} + p_{j2}$$

Les pertes fer dans le circuit magnétique :  $p_{fer} = p_{hystérésis} + p_{courant\ de\ foucault}$

Le bilan de puissance d'un transformateur réel qui alimente une charge s'écrit :

$$P_1 = P_2 + \sum \text{pertes}$$

$$P_1 = P_2 + p_{j1} + p_{j2} + p_{fer}$$

#### V.14. Le rendement d'un transformateur réel

On peut définir le rendement  $\eta$  comme étant le rapport entre la puissance fournie à la charge au secondaire notée  $P_2$  et la puissance demandée par le transformateur  $P_1$  au primaire :

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

Si on connaît la valeur des pertes et la puissance mesurée au primaire  $P_1$ , le rendement s'écrit selon la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_1 - p_{j1} - p_{j2} - p_{fer}}{P_1}$$

Si on connaît la puissance mesurée au secondaire  $P_2$ , le rendement vaut :

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + p_{j1} + p_{j2} + p_{fer}}$$



**Remarque :**

1-Le rendement généralement est exprimé en pourcentage %, dans un transformateur réel  $P_2 < P_1$ , le rendement  $\eta < 1$ .

2-Le rendement varie selon les conditions de fonctionnement de transformateur : Dans les conditions de fonctionnement nominales, le transformateur a un bon rendement.

**V.15. Evaluation du rendement d'un transformateur**

Le calcul du rendement peut s'effectuer par deux méthodes :

**V.15.1 -Méthode de mesure directe :**

Dans cette méthode on mesure la puissance absorbée et la puissance et la puissance fournie à la charge en utilisant deux wattmètres comme il est illustré sur la figure suivante fig 5.7 :

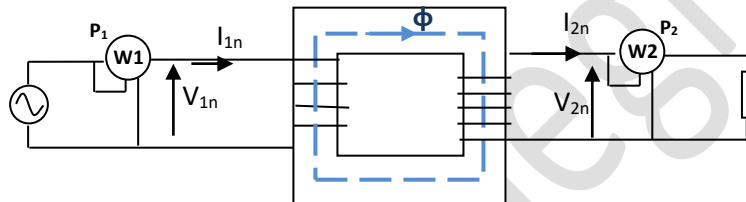


Fig .5.7. Evaluation du rendement par mesure directe

Après mesure le rendement se calcule selon la relation :  $\eta = \frac{P_2}{P_1}$

**V.15.2.- Mesure par la méthode des pertes séparée :**

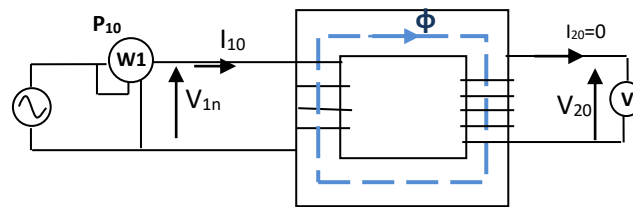
La méthode des pertes séparées s'appuie sur l'origine des pertes d'un transformateur qui sont :

- Les pertes cuivre qui sont les pertes par effet Joules dans les enroulements.
- Les pertes fer les pertes dans le matériau ferromagnétique du circuit magnétique.

Deux essais particuliers du transformateur permettent de mesurer séparément ces pertes dans les conditions nominales :

**V.15.2.1. Essai à vide d'un transformateur :**

Le primaire du transformateur est sous une tension nominale  $V_{10}=V_{1n}$ , (indice 0 indique l'essai à vide), Le secondaire n'alimente aucune charge (transformateur à vide) on place un voltmètre pour mesurer la tension  $V_{20}$  dans ces conditions comme le montre la figure 5.8



**Fig. 5.8. Montage d'un essai à vide d'un transformateur**

Dans l'essai à vide (le transformateur n'alimente aucune charge)  $I_{20} = 0$  donc  $p_{j2} = 0$  et la puissance fournie  $P_2 = 0$

Le bilan de puissance du transfo lors d'un essai à vide est :

$$P_{10} = p_{j1} + p_{fer}$$

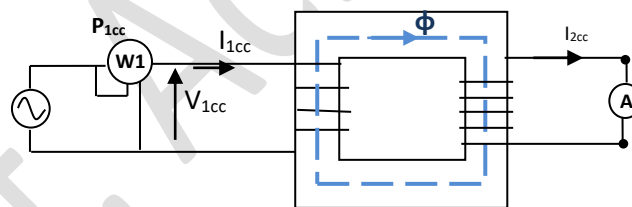
À vide le courant  $I_{10}$  est faible par conséquent :

$$P_{10} \approx p_{fer}$$

La lecture du wattmètre 1 dans l'essai à vide indique les pertes fer.

#### V.15.2.2. Essai en court-circuit d'un transformateur :

Le secondaire du transformateur est court-circuité, un ampèremètre est placé pour mesurer le courant  $I_{2cc}$ , l'alimentation du primaire doit être sous tension réduite  $V_{1cc} \ll V_{1n}$  (ne dépasse pas les 10% de la tension nominale) le montage est bien illustré dans la figure 5.9



**Fig.5.9. Montage d'un essai en court-circuit du transformateur**

Les bornes de l'enroulement secondaire sont court-circuitées.

La puissance  $P_{1cc}$  au primaire en court-circuit correspond à :

$$P_{1cc} = p_{j1cc} + p_{j2cc} + p_{fer}$$

Suite à ce que la mesure est faite sous tension  $V_1$  réduite, par conséquent les pertes fer  $p_{fer}$  sont négligeables devant les pertes cuivre :

$$P_{1cc} = p_{j1cc} + p_{j2cc}$$