

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Mohamed Khider- Biskra**  
**Faculté des sciences et de la Technologie**  
**Département de Génie Electrique**



**Support de Cours**

# **TP Electrotechnique**

## **Fondamentale 1**

**Niveau : 2<sup>ème</sup> Année Licence**  
**Spécialité : Génie Electrique**

**Préparé par: Dr. Mohamed Lotfi KHENE**

**Année Universitaire : 2015/2016**

# Table des Matières

<b>TP 01 : Mesure de puissance en monophasé</b>	
I. Rappel théorique	01
I.1. Définitions	01
I.1.1. La puissance active	01
I.1.2. La puissance réactive	01
I.1.3. La puissance apparente	01
I.1.4. Dipôles linéaires passifs	02
a. Impédance et admittance	02
b. Dipôles linéaires passifs élémentaires	02
I.2. Mesure de puissance en monophasé	03
II. Partie pratique	04
II.1. But de la manipulation	04
II.2. Mesure de puissance en monophasé	04
III. Travail demandé	04
<b>TP 02 : Mesure de puissance en triphasé (partie I)</b>	
I. Rappel théorique	05
I.1. Définitions	05
I.1.1 Installation triphasé	05
a. Tensions simples-Tensions composées	05
b. Système triphasé équilibré	05
c. Système direct-Système inverse	05
d. Réseau de distribution électrique	05
I.1.2 Couplage en étoile	06
I.1.3 Couplage en triangle	07
I.1.4 La puissance active totale	08
I.1.5 La puissance réactive totale	08
I.1.6 La puissance apparente	08
I.2. Méthodes de mesure de puissance en triphasé	09
I.2.1 Méthode de trois wattmètres	09
I.2.2 Méthode d'un seul wattmètre	09
II. Partie pratique	10
II.1. But de la manipulation	10
II.2. Mesure de puissance en triphasé	10
<b>TP 03 : Mesure de puissance en triphasé (partie II)</b>	
I. Rappel théorique	12
I.1. Méthodes de mesure de puissances en triphasé	12
I.1.1 Méthode de deux wattmètres	12
I.1.2 Méthode de Boucherot	13
II. Partie pratique	13
II.1. But de la manipulation	13
II.1.1 Charge inductive	14

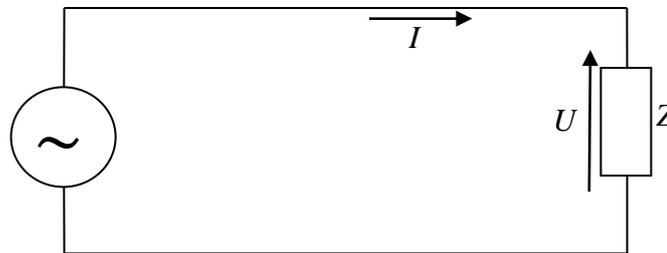
II.1.2 Charge capacitive	14
<b>TP 04 : Circuit Magnétique</b>	
I. Rappel théorique	16
I.1. Définitions	16
I.1.1 Circuit magnétique	16
I.1.2 Champs magnétique et induction magnétique	16
I.1.3 Force magnétomotrice $F. m. m$	17
I.1.4 Théorème d'Ampère	17
I.1.5 Milieux amagnétiques	17
I.1.6 Milieux ferromagnétiques	18
I.1.7 Cycle d'hystérésis d'un matériau ferromagnétique	18
a. Saturation d'un matériau ferromagnétique	18
c. Induction rémanente	18
d. Désaimantation d'un matériau ferromagnétique	18
I.1.8 Flux d'induction magnétique	19
I.1.9 Réductance d'un circuit magnétique	20
I.1.10 Analogie entre circuits électriques et magnétiques	21
II. Partie pratique	21
II.1. But de la manipulation	21
a. Théorème d'HOPKINSON	22
c. Formule de BOUCHEROT	22
II.2. Entrefer constant (sans cales)	22
II.3. Entrefer variable (en introduisant des cales)	23
II.4. Entrefer constant (avec cales)	23
II.5. Cycle d'hystérésis (sans cales)	23
<b>TP 05 : Transformateur (partie I)</b>	
I. Rappel théorique	24
I.1. Définitions	24
I.1.1 Transformateur	24
I.1.2 Notations et symbolisation	24
I.1.3 Fonctionnement à vide	25
II. Partie pratique	27
II.1. But de la manipulation	27
II.2. Essai à vide	27
II.3. Essai en court circuit	29
<b>TP 06 : Transformateur (partie II)</b>	
I. Rappel théorique	31
I.1. Définitions	31
I.1.1 Fonctionnement en charge	31
I.1.2 Rendement du transformateur	32
II. Partie pratique	33
II.1. Essai en charge	33
Bibliographie	34

# **TP01 : Mesure de Puissance en Monophasé**

**I. Rappel théorique**

**I. 1. Définition**

La figure ci-dessous présente le schéma de principe d'un circuit monophasé.



**Figure. 1**

Tout système électrique utilise le courant alternatif met en jeu deux formes de puissances : active et réactive.

**I. 1. 1. La puissance active  $P$**

Elle se transforme intégralement en puissance utile de forme mécanique, thermique ou lumineuse. La puissance active moyenne est défini par la relation suivante :

$$P = U I \cos(\varphi) \quad (\text{W})$$

Avec  $\varphi$  est le déphasage entre le courant  $I$  et la tension  $U$ .

**I. 1. 2. La puissance réactive  $Q$**

Elle sert à la magnétisation des circuits magnétiques des machines électriques (transformateurs et moteurs). La puissance réactive correspond une énergie réactive qui va périodiquement de la source vers le récepteur puis du récepteur vers la source, et ainsi de suite sans ne jamais être absorbée par le récepteur.

L'existence d'une puissance réactive conduit à une augmentation du courant dans le générateur et la ligne alimentant le récepteur. Cette augmentation engendre un surcroît de pertes et nécessite un surdimensionnement des moyens de transport. La puissance réactive moyenne est défini par la relation suivante :

$$Q = U I \sin(\varphi) \quad (\text{VAR})$$

**I. 1. 3. La puissance apparente  $S$**

Elle est égale à la somme vectorielle des deux puissances actives et réactives (théorème de Boucherot) et elle permet de déterminer la valeur du courant absorbé par la charge. La puissance apparente est donnée par :

$$S = U I \quad (\text{VA})$$

A partir des expressions ci-dessus on peut écrire :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$\cos(\varphi) = P/S \quad \text{C'est le facteur de puissance}$$

$$Q = P \cdot \operatorname{tg}(\varphi)$$

**I. 1. 4. Dipôles linéaires passifs**  
**a. Impédance et admittance**

Pour un dipôle linéaire passif, la relation entre la grandeur complexe  $\bar{U}$  associée à la tension et la grandeur complexe  $\bar{I}$  associée au courant est linéaire. Si le courant et la tension sont orientés en convention récepteur, cette formule s'écrit :

$$\bar{U} = \bar{Z} \cdot \bar{I}$$

$\bar{Z}$  est l'impédance du dipôle. Elle s'exprime en ohms ( $\Omega$ ). Son inverse  $\bar{Y}$  est appelé admittance du dipôle et s'exprime en siemens (S) :

$$\bar{Y} = \frac{1}{\bar{Z}}$$

La relation entre courant et tension peut ainsi se mettre sous la forme :

$$\bar{I} = \bar{Y} \bar{U}$$

L'impédance et l'admittance sont des nombres complexes qui peuvent être mis sous forme cartésienne ou sous forme trigonométrique :

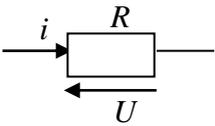
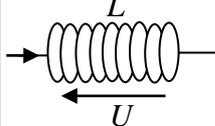
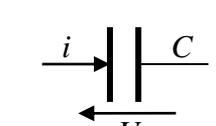
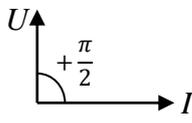
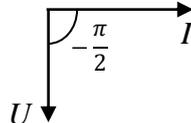
$$\bar{Z} = R + jX = |Z| e^{j\varphi}$$

$$\bar{Y} = G + jB = |Y| e^{-j\varphi}$$

$R$  est la résistance,  $X$  la réactance,  $G$  la conductance et  $B$  la susceptance du dipôle. Les deux premières grandeurs s'expriment en ohms et les deux dernières en siemens.

**b. Dipôles linéaires passifs élémentaires**

Il existe trois passifs élémentaires : la résistance, la bobine et le condensateur. Nous en rappelons les principales caractéristiques dans le tableau suivant :

	Résistance	Bobine	Condensateur
Symbole			
Relation entre Tension et courant	$U = R i$	$U = L \frac{d i}{d t}$	$i = C \frac{d U}{d t}$
Relation entre grandeurs complexes	$\bar{U} = R \bar{I}$	$\bar{U} = jL\omega \bar{I}$	$\bar{U} = \frac{\bar{I}}{jC\omega}$
Impédance	$\bar{Z} = R$	$\bar{Z} = jL\omega$	$\bar{Z} = \frac{1}{jC\omega}$
Relation entre valeurs efficaces	$U = R I$	$U = L\omega I$	$U = \frac{1}{C\omega} I$
Déphasage du courant par rapport à la tension	$\varphi = 0$	$\varphi = +\frac{\pi}{2}$	$\varphi = -\frac{\pi}{2}$
Représentation de Fresnel			

## I. 2 Mesure de puissances en monophasé

La puissance active est mesurée directement par un wattmètre. Le wattmètre monophasé est un appareil de mesure de puissance en monophasé. Il est constitué de deux bobines : une bobine courant qui permet de mesurer le courant qui traverse la charge (équivalent à un ampèremètre), et une bobine tension mesurent la tension aux bornes de la charge (équivalent à un voltmètre).

L'indication du wattmètre est proportionnelle à la valeur moyenne de la puissance active en alternatif. La puissance apparente d'un système monophasé est mesurée à l'aide d'un voltmètre et un ampèremètre en calculant le produit (tension  $\times$  courant).

Concernant la puissance réactive et le facteur de puissance, ils peuvent être déduites en utilisant les relations décrites précédemment.

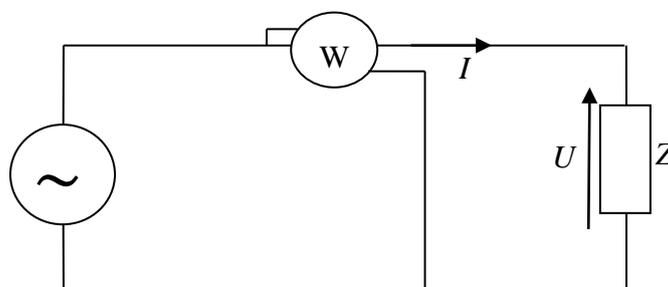


Figure. 2

## II. Partie Pratique

### I. 1 But de la manipulation

Apprendre la mesure de la puissance pour des circuits monophasés et déterminer les puissances réactives et apparentes ainsi que le facteur de puissance pour les charges étudiées.

### II. 2 Mesure de puissance en monophasé

Réaliser le montage de la figure 3 :

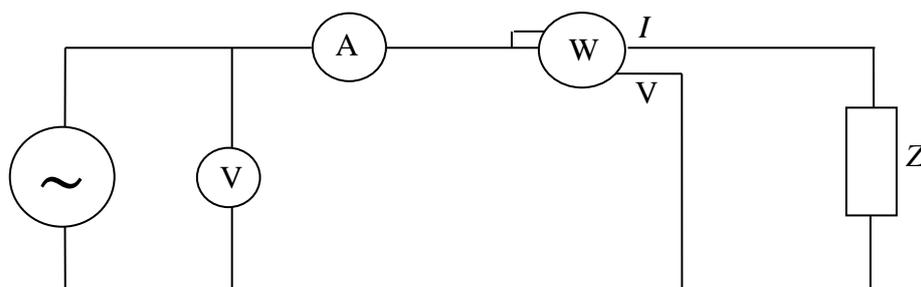


Figure. 3

La charge  $Z$  est constituée de la mise en série des éléments passifs dont les valeurs correspondantes sont les suivantes :

- Rhéostat de  $R = 330 \Omega$  ; courant maximal admissible  $1A$ .
- Bobine à noyau de fer d'inductance  $L = 1H$  et de résistance interne  $r = 40 \Omega$ .
- Condensateur de capacité  $C = 8 \mu F$ .

Pour chaque récepteur, compléter le tableau suivant :

Charges	Mesure				Calcul			
	$U (V)$	$I (A)$	$P (W)$	$Q (VAR)$	$S (VA)$	$Q (VA)$	$\cos(\varphi)$	$\varphi (^\circ)$
$R$								
$L, r$								
$C$								
$R + (L, r)$								
$R + (L, r) + C$								

### III. Travail demandé

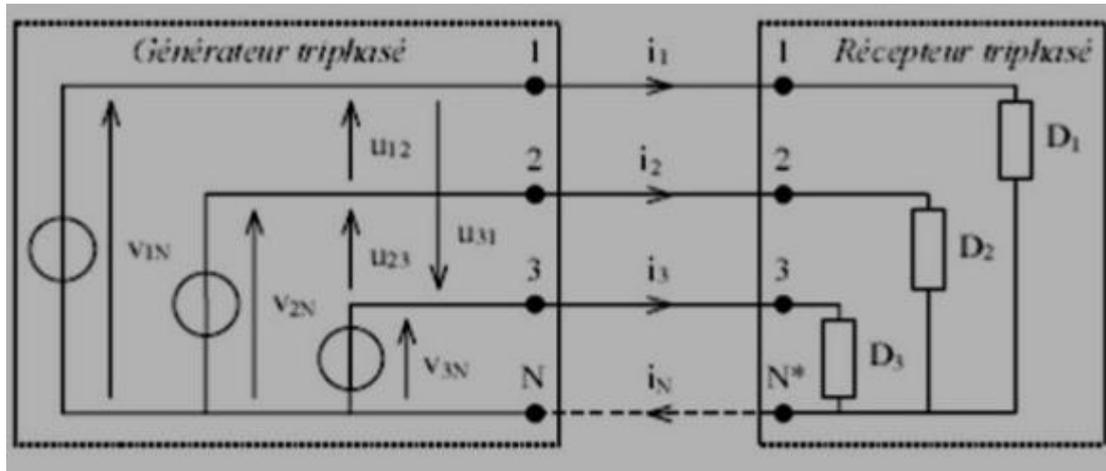
- 1- Interpréter les résultats obtenus.
- 2- Quels sont les symboles portés sur le cadran d'un wattmètre ?
- 3- Identifier les bornes de branchement d'un wattmètre et dire combien de calibres de courant et combien de calibres de tension possède t-il ?
- 4- Comment brancher un wattmètre dans un circuit électrique pour mesurer une puissance

**TP02 : Mesure de Puissance  
en Triphasé (Partie I)**



**I- Rappel théorique**  
**I- 1 Définition**  
**I- 1- 1 Installation triphasée**

Le transport de l'énergie électrique en triphasé est le plus économique car il requiert une quantité minimale de câble métallique pour transporter une puissance donnée ; les moteurs triphasés sont simples et efficaces, le redressement est aisé. Une installation triphasée comporte trois fils de phases et, éventuellement, un fil de neutre (Fig.1).



**Figure. 1**

- a. **Tensions simples – Tensions composées.** Les tensions simples  $V_{1N}$ ,  $V_{2N}$  et  $V_{3N}$  sont prises entre une des phases et le neutre, et les tensions composées  $U_{12}$ ,  $U_{23}$  et  $U_{31}$  sont prises entre deux phases (voir Fig.1).
- b. **Système triphasé équilibré.** Trois grandeurs sinusoïdales de même fréquence, déphasées entre elles de  $2\pi/3$ , et ayant même valeur efficace, forment un système triphasé équilibré.
- c. **Système direct – Système inverse.** Le système triphasé ( $g_1, g_2, g_3$ ) est dit direct si  $g_3$  est en retard d'un angle  $2\pi/3$  sur  $g_2$  qui est en retard d'un angle  $2\pi/3$  sur  $g_1$ . Autrement, le système est dit inverse.
- d. **Réseau de distribution électrique.** Il est basé sur un système triphasé de tensions. On peut généralement considérer que  $(V_{1N}, V_{2N}, V_{3N})$  est un système de tensions triphasé équilibré direct. Il en est de même pour  $(U_{12}, U_{23}, U_{31})$ .  
On a :

$$\begin{cases} U_{12} = V_{1N} - V_{2N} \\ U_{23} = V_{2N} - V_{3N} \\ U_{31} = V_{3N} - V_{1N} \end{cases} \begin{cases} V_{1N} = V_{max} \sin(\omega t) \\ V_{2N} = V_{max} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{3N} = V_{max} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \begin{cases} \overline{V_{1N}} = V_{max} \\ \overline{V_{2N}} = V_{max} e^{-j\frac{2\pi}{3}} \\ \overline{V_{3N}} = V_{max} e^{-j\frac{4\pi}{3}} \end{cases}$$

Diagramme temporel des tensions simples : (Fig.2)

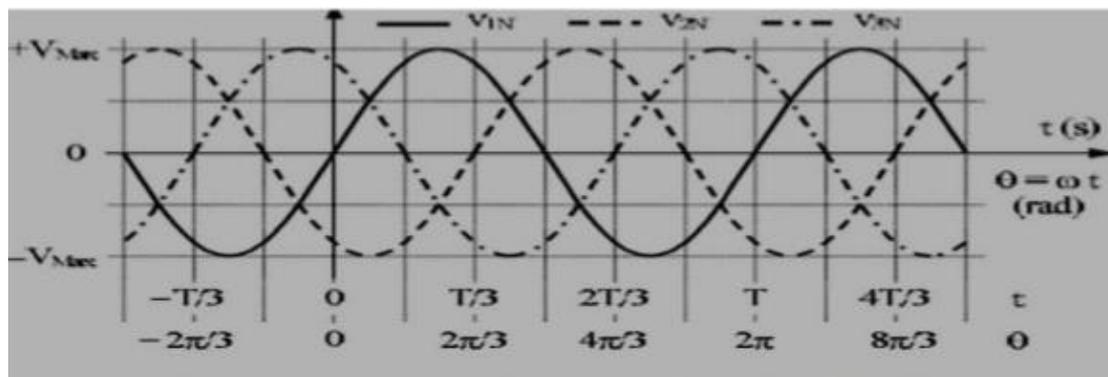


Figure. 2

**Remarque :**

- Dans ces conditions, si les trois récepteurs sont identiques, alors  $(i_1, i_2, i_3)$  est un système de courants triphasé équilibré.
- Dans ces conditions, si le neutre du récepteur est relié au neutre du générateur ( $V_{1N^*}$ ,  $V_{2N^*}$  et  $V_{3N^*}$ ) est un système de tensions triphasé équilibré.

**I- 1-2 Couplage en étoile**

Dans un couplage en étoile, chaque dipôle est relié entre le neutre et une phase du réseau (Fig. 3).

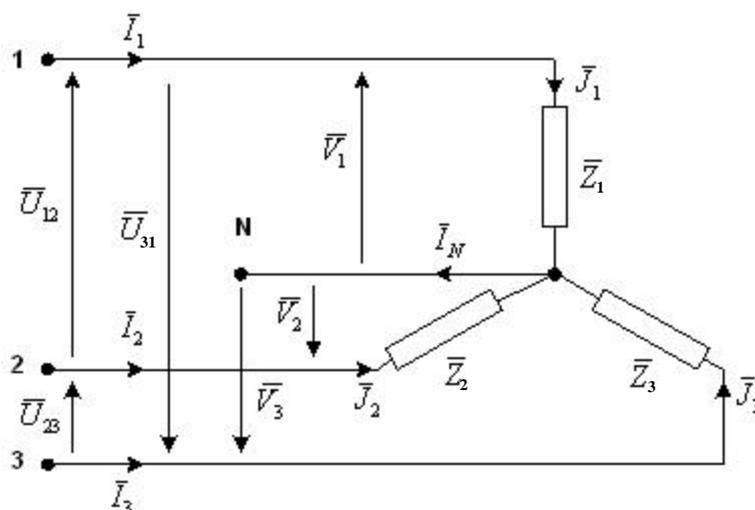


Figure. 3

Le point N étant relié au neutre du réseau, les tensions appliquées aux bornes des dipôles sont les tensions simples du réseau, et les courants en ligne sont les mêmes que les courants dans les récepteurs.

$$i_N = i_1 + i_2 + i_3$$

Soit, en complexe :

$$\bar{I}_N = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3$$

Avec  $\bar{I}_1 = \frac{\bar{V}_{1N}}{\bar{Z}_1}$      $\bar{I}_2 = \frac{\bar{V}_{2N}}{\bar{Z}_2}$      $\bar{I}_3 = \frac{\bar{V}_{3N}}{\bar{Z}_3}$

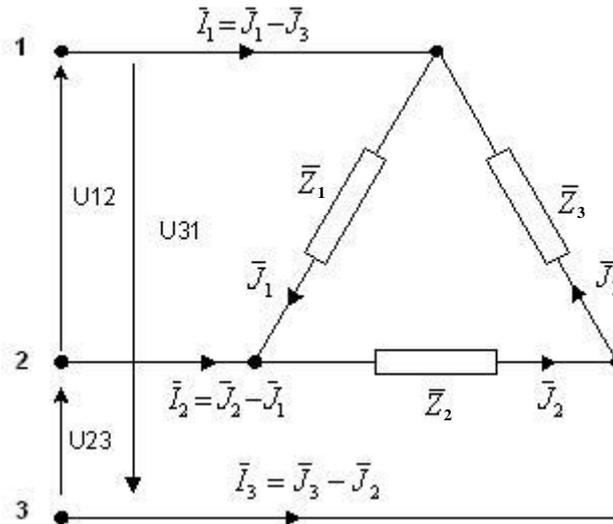
Où  $\bar{Z}_1, \bar{Z}_2$  et  $\bar{Z}_3$  sont respectivement les impédances des dipôles  $D_1, D_2$  et  $D_3$

**Remarque :**

Pour un récepteur équilibré couplé en étoile  $\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 = \bar{Z}_3$ , le courant dans le neutre est nul.

**I- 1-3 Couplage en triangle**

Dans un couplage en triangle, chaque dipôle est relié entre deux phases du réseau (Fig.4). Le neutre est inutilisé.



Les tensions appliquées aux bornes des dipôles sont les tensions composées du réseau, et les courants en ligne sont différents des courants dans les récepteurs.

$$\begin{cases} i_1 = j_1 - j_3 \\ i_2 = j_2 - j_1 \\ i_3 = j_3 - j_2 \end{cases} \quad \text{et} \quad i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

Avec, en complexe :

$$\bar{J}_1 = \frac{\bar{U}_{12}}{\bar{Z}_1} \quad \bar{J}_2 = \frac{\bar{U}_{23}}{\bar{Z}_2} \quad \bar{J}_3 = \frac{\bar{U}_{31}}{\bar{Z}_3}$$

Où  $\bar{Z}_1, \bar{Z}_2$  et  $\bar{Z}_3$  sont respectivement les impédances des dipôles  $D_1, D_2$  et  $D_3$

**Remarque :**

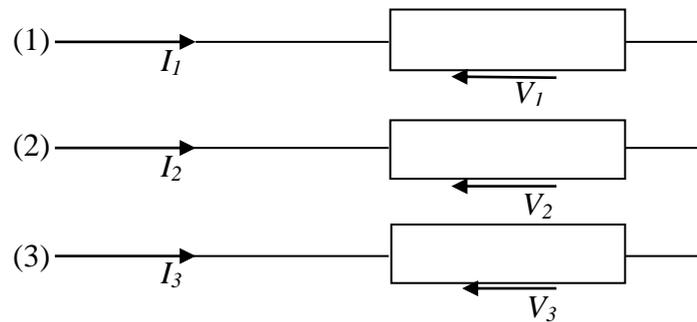
Le récepteur est équilibré si les dipôles sont identiques. Ce qui s'écrit :

$$\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 = \bar{Z}_3$$

D'où : 
$$\bar{J}_1 + \bar{J}_2 + \bar{J}_3 = 0$$

**I- 1-4 La puissance active totale  $P$**

Soit le récepteur triphasé monté en étoile de la figure ci-dessous.



**Figure. 4**

La puissance active totale consommée par ce récepteur triphasé est la somme des puissances actives consommées par ses trois éléments :

$$P = V_1 I_1 \cos \varphi_1 + V_2 I_2 \cos \varphi_2 + V_3 I_3 \cos \varphi_3$$

Ou  $V_i$  et  $I_i$  ( $i = 1 \dots 3$ ) sont les valeurs efficaces des tensions et des courants simples.

Pour un récepteur équilibré on a :  $V_1 = V_2 = V_3 = V$ ,  $I_1 = I_2 = I_3 = I$  et  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi$

La puissance active totale peut être exprimée par la relation :

$$P = 3 V I \cos(\varphi) = \sqrt{3} U I \cos(\varphi) \quad (\text{W})$$

Avec  $U$  est la tension composée entre deux phases et  $V$  est la tension simple entre phase et neutre.

**I- 1-5 La puissance réactive totale  $Q$**

De la même façon, la puissance réactive totale de ce système triphasé peut s'exprimer par :

$$Q = 3 V I \sin(\varphi) = \sqrt{3} U I \sin(\varphi) \quad (\text{VAR})$$

**I- 1-6 La puissance apparente  $S$**

Par conséquent la puissance apparente d'un système triphasé est donnée par :

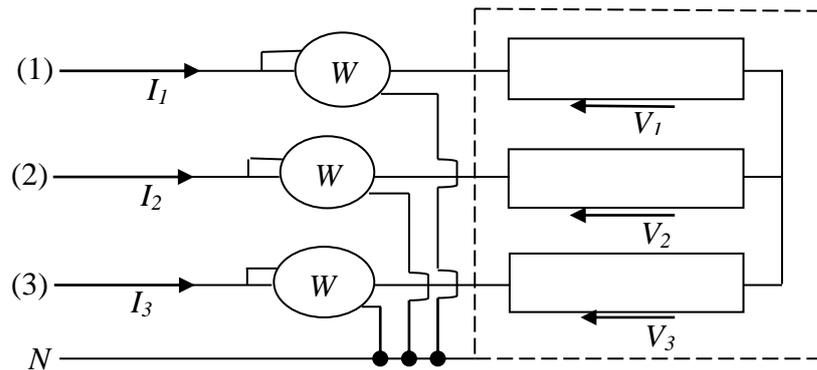
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3 V I = \sqrt{3} U I \quad (\text{VA})$$

La connaissance des différentes puissances définies ci-dessus est fondamentale en électrotechnique, puisque elle permet de calculer avec précision les caractéristiques du matériel utilisé : rendement, charge, facteur de puissance, limites d'utilisation.

**II- 1 Méthodes de mesure de puissances en triphasé**

**II- 1- 1 Méthode de trois wattmètres**

Lorsque le système triphasé est non équilibré et avec neutre branché (système non équilibré à 4 fils), on doit utiliser trois wattmètres pour mesurer la puissance totale



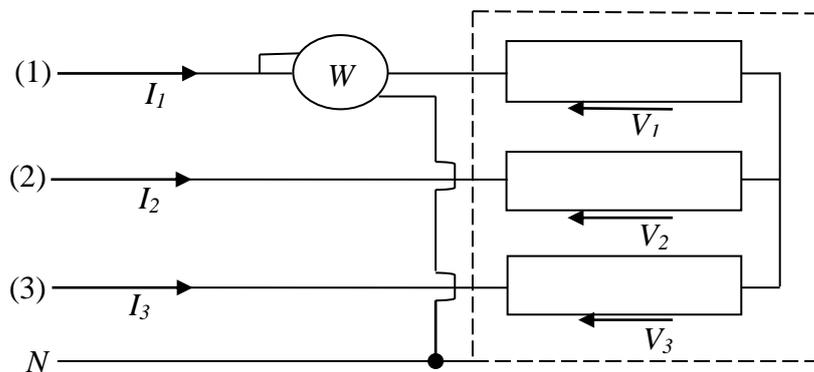
**Figure. 5**

Dans ce cas, la puissance active totale est :

$$P = W_1 + W_2 + W_3$$

**II- 1- 2 Méthode d'un seul wattmètre**

Cette méthode est valable lorsque le système triphasé est équilibré et avec neutre branché (système équilibré à 4 fils)



**Figure. 6**

La bobine courant est branchée sur la ligne (1), elle est donc traversée par le courant  $I_1$ . La bobine tension du même wattmètre est branchée entre les lignes (1) et le neutre, elle mesure donc la tension simple  $V_1$ . L'indication du wattmètre est donc :

$$W = (V_1 I_1)_{\text{moy}} = V I \cos(\varphi)$$

Par conséquent, on peut déduire que la puissance active totale de ce système est :

$$P = 3 V I \cos(\varphi) = 3W$$

### III- Partie Pratique

#### III- 1 But de la manipulation

Apprendre la mesure de la puissance pour des circuits triphasés et déterminer les puissances actives, réactives et apparentes ainsi que le facteur de puissance pour les charges étudiées.

#### III- 2 Mesure de puissance en triphasé

Lors des essais, nous considérons un récepteur purement résistif.

Le récepteur est constitué de 3 résistances (3 rhéostats de résistance  $R=1000\Omega$  chacun, courant maximal admissible  $I_{\text{max}} = 0.57A$ ) identiques. La charge est équilibrée.

a. Réaliser le montage suivant :

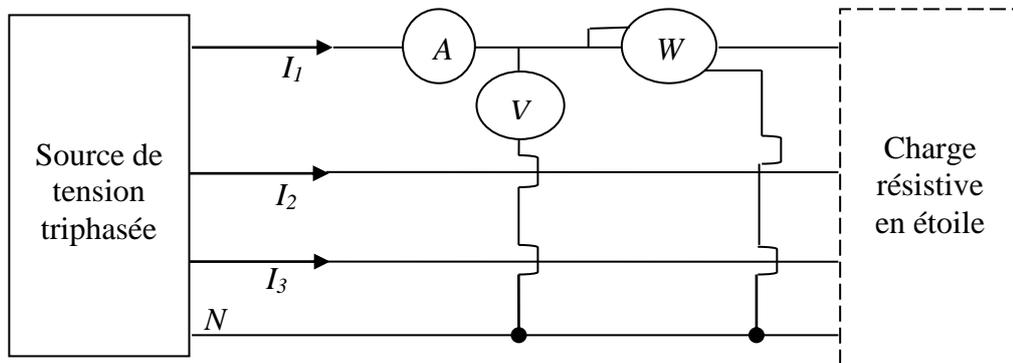


Figure. 7

b. Complétez le tableau suivant :

Valeurs à mesurer			Valeurs à calculer			
V (V)	I (A)	$W_1$	S(VA)	P (W)	Q (VAR)	$\cos(\varphi)$

c. Réaliser le montage suivant :

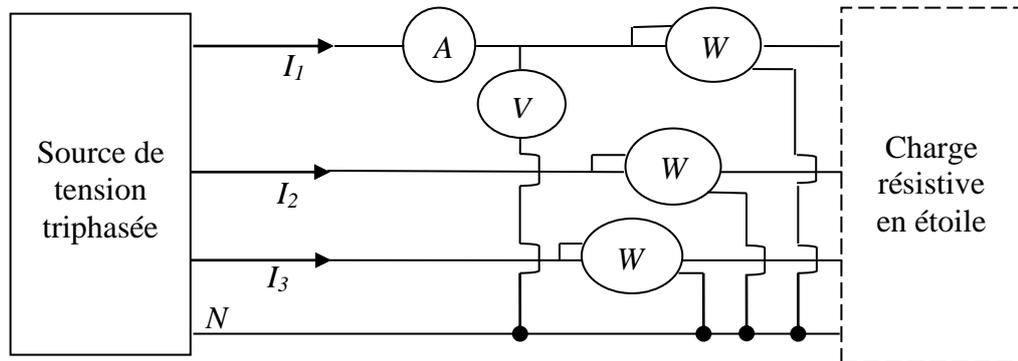


Figure. 8

d. Complétez le tableau suivant :

Valeurs à mesurer					Valeurs à calculer			
$V (V)$	$I (A)$	$W_1 (W)$	$W_2 (W)$	$W_3 (W)$	$S (VA)$	$P (W)$	$Q (VAR)$	$\cos(\varphi)$

e. Comparer les résultats obtenus et qu'est ce que vous constatez

# **TP03 : Mesure de Puissance en Triphasé (Partie II)**

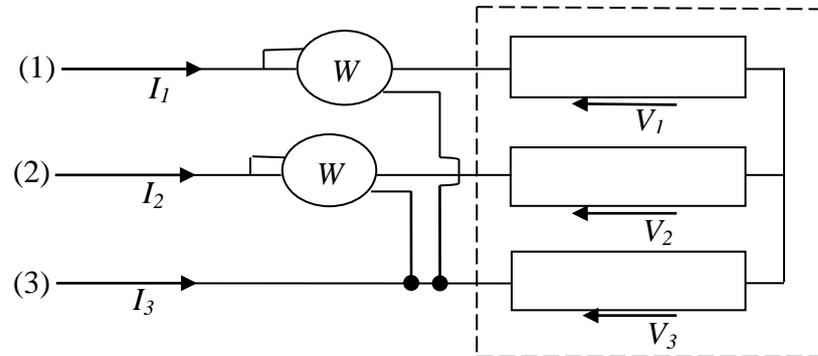


**I- Rappel théorique**

**I- 1- Méthodes de mesure de puissances en triphasé**

**I- 1- 1 Méthode des deux wattmètres**

Cette méthode de mesure est utilisée pour les systèmes triphasés sans neutre. Elle permet la mesure des puissances active et réactive. Le montage correspondant à la méthode est le suivant :



**Figure. 1**

- La bobine courant du 1<sup>ère</sup> wattmètre est branchée sur la ligne(1), elle est donc traversée par le courant  $I_1$ . La bobine tension du même wattmètre est branchée entre les lignes (1) et (3), elle mesure donc la tension composée  $U_{13} = V_1 - V_3$ . L'indication du 1<sup>ère</sup> wattmètre est donc :

$$W_1 = (U_{13}I_1)_{moy} = UI \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{6}\right) = UI \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\varphi) + \frac{1}{2} \sin(\varphi) \right)$$

- La bobine courant du 2<sup>ème</sup> wattmètre est branchée sur la ligne(2), elle est donc traversée par le courant  $I_2$ . La bobine tension du même wattmètre est branchée entre les lignes (2) et (3), elle mesure donc la tension composée  $U_{23} = V_2 - V_3$ . L'indication du 2<sup>ème</sup> wattmètre est donc :

$$W_2 = (U_{23}I_2)_{moy} = UI \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{6}\right) = UI \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\varphi) - \frac{1}{2} \sin(\varphi) \right)$$

On montre que la puissance active totale de ce système triphasé est la somme des indications des deux wattmètres :

$$P = W_1 + W_2 = \sqrt{3} UI \cos(\varphi)$$

De même pour la puissance réactive on à :

$$W_1 - W_2 = U I \sin(\varphi) = \frac{Q}{\sqrt{3}}$$

Donc :  $Q = \sqrt{3}(W_1 - W_2)$

### I- 1- 2 Méthode de Boucherot

Elle permet seulement de mesurer la puissance réactive. Le montage correspondant à la méthode est le suivant :

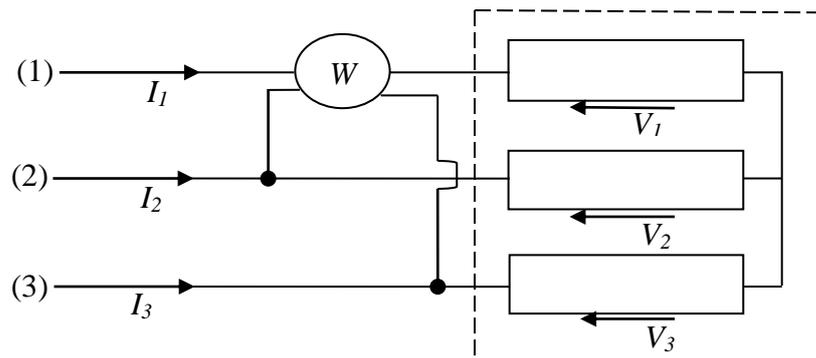


Figure.2

La bobine courant du wattmètre est traversé par le courant  $I_1$ . La bobine tension du même wattmètre est branchée entre les lignes (2) et (3), elle mesure donc la tension composée  $U_{23} = V_2 - V_3$ .

L'indication du wattmètre est donc :

$$W = (U_{23} I_1)_{moy} = U I \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right) = U I \sin(\varphi) = \frac{Q}{\sqrt{3}}$$

Donc la puissance réactive mesurée est :  $Q = \sqrt{3} W$

**Remarque :** Les résultats de ces méthodes sont valables pour les récepteurs couplés en étoile ou en triangle.

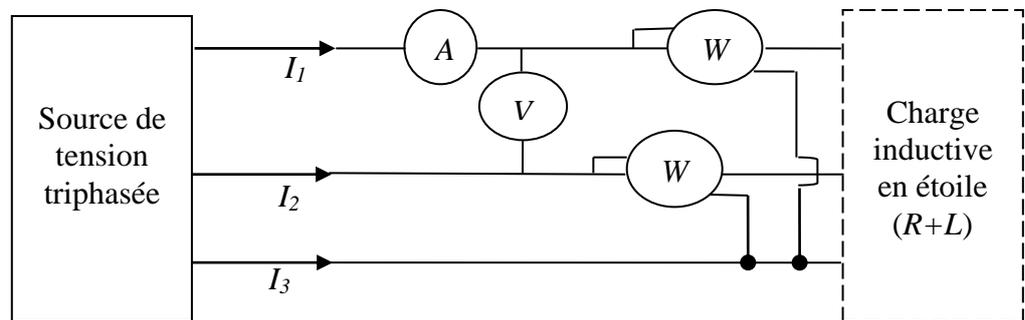
### II- Partie Pratique

#### II- 1 But de la manipulation

Apprendre la mesure de la puissance pour des circuits triphasés et déterminer les puissances actives, réactives et apparentes ainsi que le facteur de puissance pour les charges étudiées.

**II- 1. 1. Charge inductive**

a. Réaliser le montage suivant :



**Figure.3**

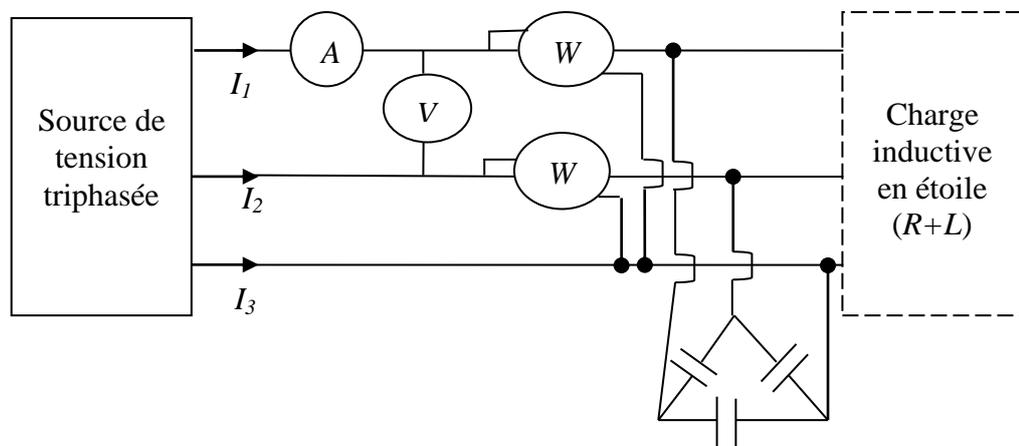
b. Complétez le tableau suivant :

Différentes charges $R, L$	Valeurs à mesurer				Valeurs à calculer			
	$U$ (V)	$I$ (A)	$W_1$	$W_2$	$P$ (w)	$Q$ (VAR)	$S$ (VA)	$\cos(\varphi)$

c. Expliquer l'effet de la variation de la charge inductive sur le courant, les différentes puissances ainsi que le facteur de puissance.

**II. 1. 2. Charge capacitive**

a. Réaliser le montage suivant :



**Figure. 4**

- b. Pour une charge  $R, L$  donnée, complétez le tableau suivant en variant la charge  $C$

Différentes Valeurs pour $C$	Valeurs à mesurer				Valeurs à calculer			
	$U (V)$	$I (A)$	$W_1$	$W_2$	$P (w)$	$Q (VAR)$	$S (VA)$	$\cos(\varphi)$

- c. Expliquer l'effet de la variation de la capacité sur le courant, les différentes puissances ainsi que le facteur de puissance.  
 d. Quelle est l'intérêt d'associer des condensateurs avec une charge inductive.

# **TP04 : Circuit Magnétique**



**I- Rappel théorique**  
**I- 1 Définitions**  
**I- 1- 1 Circuit magnétique**

Un circuit magnétique est le volume où se referment toutes les lignes de force d'un champ magnétique. Dans tous les domaines où on aura à utiliser des phénomènes magnétiques (par exemple : machines, appareils de mesure), on sera amené à canaliser les lignes de force dans un circuit bon conducteur du flux magnétique. Ce circuit sera constitué par des matériaux dits ferromagnétiques et en particulier par du fer. On obtient un champ magnétique grâce à des aimants permanents ou bien des circuits électriques parcourus par des courants.

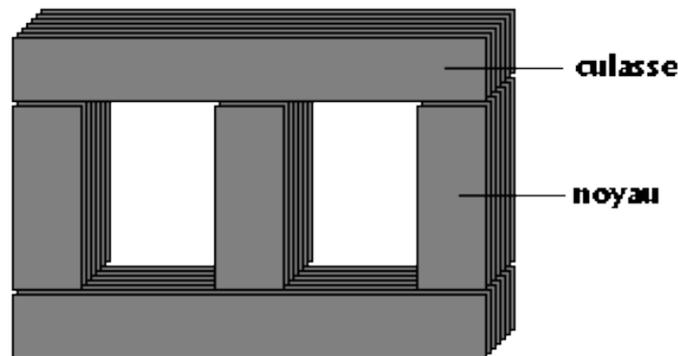


Figure. 1

**I- 1- 2 Champs magnétique et induction magnétique**

Lorsqu'un champ magnétique  $H$  circule dans un matériau ferromagnétique, il se crée, dans le matériau, une induction magnétique  $B$ , dont la variation suit la relation :

$$B = \mu H$$

Avec :

$B$  : Induction magnétique en (T),

$H$  : Champ magnétique en (A/m),

$\mu$  : Perméabilité magnétique du matériau.

On définit la perméabilité relative comme suit :

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Avec

$\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$ : Perméabilité de vide.

Le tableau suivant donne les perméabilités de quelques matériaux

Matériaux	Fer	Acier	Acier au cobalt
Perméabilité relative	10000	40000 à 50000	3500

### I- 1- 3 Force magnétomotrice F.m.m

La force magnétomotrice ( $F$ ) est la cause qui engendre le flux magnétique. Elle est définie par la relation suivante :

$$F = n.I$$

Avec :

$n$  : Nombre de spires,

$I$  : Courant traversant les spires.

### I- 1- 4 Théorème d'Ampère

La circulation de l'excitation magnétique le long d'une courbe fermée est égale à la somme algébrique des forces magnétomotrices qui traversent toute surface s'appuyant sur le contour. La somme algébrique des courants est appelée force magnétomotrice

$$\oint H dl = n.I$$

Détermination de la force magnétomotrice Il faut procéder en deux temps :  
Orientation du contour : il faut choisir un sens de parcours afin de déterminer la normale à toute surface s'appuyant sur le contour. Somme algébrique : pour la faire, il faut déterminer les courants qui doivent être comptés positifs et ceux qui doivent être comptés négatifs. Les courants dans le sens de la normale seront comptés positifs, les autres négatifs.

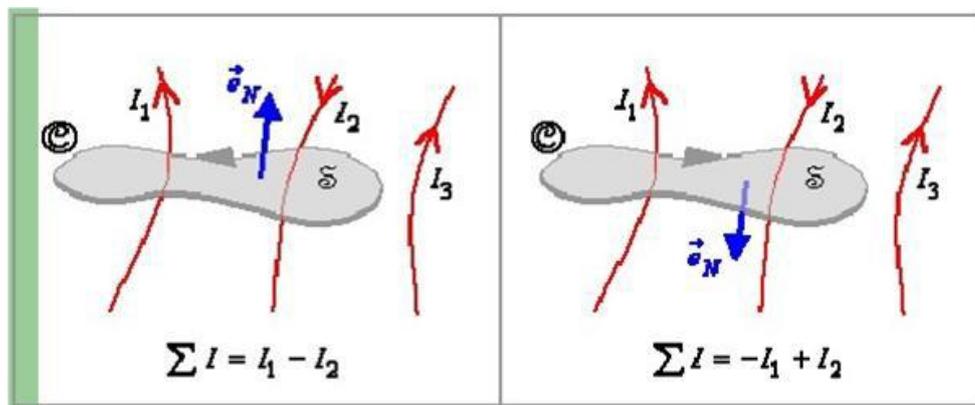


Figure. 2

### I- 1- 5 Milieux amagnétiques

Dans le vide, le vecteur d'excitation magnétique et l'induction magnétique sont proportionnels et colinéaires :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$$

Lorsque les milieux sont peu perturbés par l'excitation magnétique, on dit qu'ils sont amagnétiques (air, eau, homme, cuivre, acier inox, aluminium, bois, etc.).

La perméabilité est alors voisine de la perméabilité absolue du vide. Le vecteur d'excitation magnétique et l'induction magnétique sont quasiment proportionnels et colinéaires.

### I- 1-6 Milieux ferromagnétiques

Lorsque les milieux sont fortement modifiés par l'excitation magnétique, on dit qu'ils sont ferromagnétiques, même s'ils ne contiennent pas de fer ! (fer doux, acier, nickel, chrome, ferrites, cobalt, etc.). Dans ces milieux, le champ d'induction magnétique dépend de l'intensité de l'excitation magnétique et du passé magnétique du milieu.

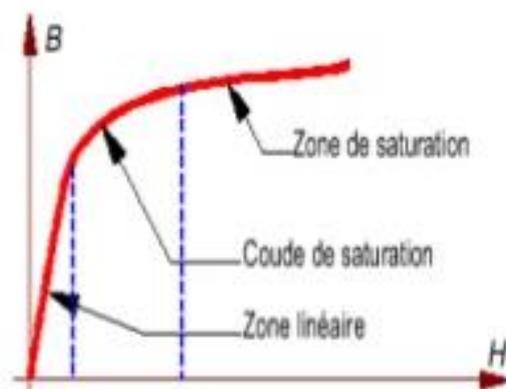


Figure. 3

Dans un milieu ferromagnétique, le vecteur d'excitation magnétique et l'induction magnétique ne sont pas proportionnels. Pour une faible intensité de l'excitation magnétique  $H$ , l'intensité de l'induction magnétique  $B$  est sensiblement proportionnelle à  $H$ . Au-delà, l'intensité  $B$  n'est pas proportionnelle à  $H$ . Et pour une forte intensité de  $H$ ,  $B$  n'augmente pratiquement plus : le milieu est saturé (Fig. 3).

### I- 1-7 Cycle d'hystérésis d'un matériau ferromagnétique

Lorsqu'un matériau magnétique a été soumis plusieurs fois à un champ magnétique intense et changeant de sens périodiquement, sa courbe d'aimantation se stabilise en un cycle d'hystérésis (Fig. 4).

• **Saturation d'un matériau ferromagnétique.**

Dès que l'intensité  $H$  de l'excitation magnétique dépasse  $H_{sat}$  (intensité de saturation) en valeur absolue, l'intensité  $B$  de l'induction magnétique ne croît plus : le matériau est saturé.

• **Induction rémanente.** Si on supprime le champ magnétique ( $H = 0$ ), il subsiste une induction magnétique non nulle, appelée induction rémanente ( $B_r$ ). Cette propriété est utilisée pour fabriquer les aimants permanents et les supports d'enregistrements magnétiques (Effet mémoire).

• **Désaimantation d'un matériau ferromagnétique.**

Pour annuler l'induction rémanente, il faut appliquer une excitation opposée, dite excitation coercitive ( $H_C$ ). Mais sa suppression, ré-aimante le matériau dans l'autre sens. La seule solution consiste à parcourir plusieurs fois le cycle d'hystérésis, en diminuant progressivement l'intensité  $H$ , jusqu'à l'annuler (tête d'effacement des magnétoscopes et magnétophones).

**Remarque :** Les matériaux magnétiques doux (le fer par exemple) possèdent des cycles d'hystérésis étroits : la désaimantation s'effectue assez facilement. Tandis que

les matériaux magnétiques durs (l'acier par exemple) possèdent des cycles d'hystérésis larges : la désaimantation nécessite de fortes excitations magnétiques. C'est pourquoi les aimants sont réalisés avec des matériaux magnétiques durs.

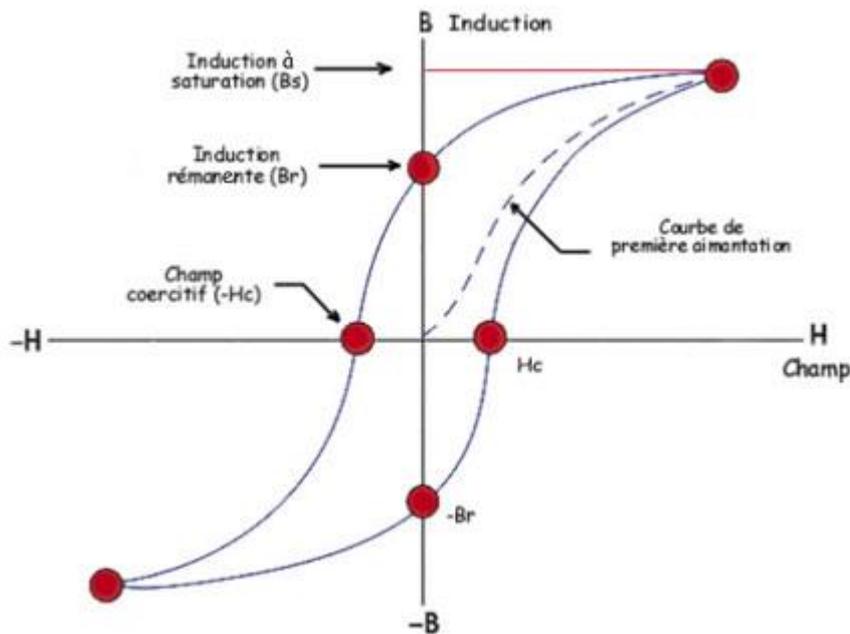


Figure. 4

### I- 1- 8 Flux d'induction magnétique

Le flux est une grandeur algébrique qui traduit la traversée d'un champ à travers la surface  $S$ . Son calcul nécessite l'orientation de  $S$  (Fig. 5).

On représente une surface par un vecteur  $\vec{S}$  dont le module est l'aire de la surface.

Ce vecteur  $\vec{S}$  est normal à la surface. Son sens (conventionnel) est déterminé à l'aide d'une courbe fermée et orientée dessinée autour de l'origine du vecteur représentant la surface.

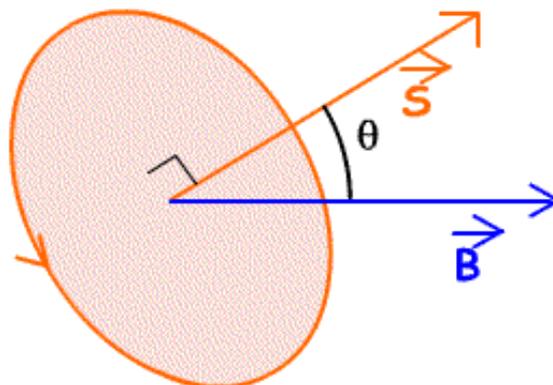


Figure. 5

Un circuit magnétique parfait (C.M.P) est un circuit où toutes les lignes d'induction sont confinées dans le matériau, on dit que le circuit est sans fuite magnétique. Il a néanmoins des pertes magnétiques fer ( $p_{fer}$ ).

**Remarque :** Le flux d'induction magnétique est conservatif (Fig. 6) dans un C.M.P. Autrement dit, le flux sortant à travers la surface latérale ( $S_{latérale}$ ) est nul.

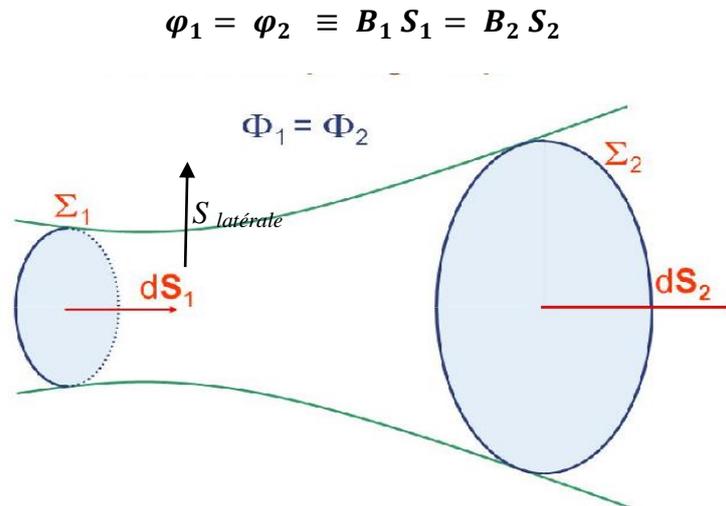


Figure. 6

### I- 1-8 Réductance d'un circuit magnétique

**Loi d'Hopkinson :** Soit un circuit magnétique enlacé par  $n$  spires parcourues par un courant  $i$ , cette source d'excitation magnétique crée une induction magnétique. L'intensité  $H$  du vecteur d'excitation magnétique le long d'une ligne de champ fermée (théorème d'Ampère) est  $H.l = n.I$ . Cette excitation magnétique crée une induction magnétique dans le circuit magnétique. d'intensité :  $B = \mu H$ . Le flux magnétique à travers une section du circuit magnétique s'écrit :

$$\varphi = B S = \mu H S = \mu \frac{n I}{l} S$$

D'où :

$$n I = \frac{1}{\mu} \frac{l}{S} \varphi$$

C'est la relation d'Hopkinson, qui s'écrit :

$$F = \mathcal{R} \varphi$$

Avec :

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu S}$$

Où  $F$  s'appelle la force magnétomotrice et s'exprime en ampères (A),  $\varphi$  est le flux magnétique et s'exprime en webers (Wb), et  $R$  s'appelle la réductance et s'exprime en inverse d'henrys ( $H^{-1}$ ).

**I- 1-9 Analogie entre circuits électriques et magnétiques**

Circuits électriques	Circuits magnétiques
$F = R \varphi$	$U = R I$
$F$ : force magnétomotrice en ampères (A) ou ampères-tours (A.tr)	$U$ : tension en volts (V)
$\varphi$ : flux magnétique en webers (Wb)	$I$ : intensité en ampères (A)
$\mathcal{R}$ : réluctance en henrys <sup>-1</sup> ( $H^{-1}$ )	$R$ : résistance en ohms ( $\Omega$ )
$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu S}$ unité $H^{-1} = \frac{1}{H/m} \frac{m}{m^2}$	$R = \frac{l}{\sigma S}$ unité $\Omega = \Omega m \frac{m}{m^2}$

**II- Partie pratique**

**II- 1 But de la manipulation :**

Etude de la force magnétomotrice  $F$  (proportionnelle au courant magnétique) en fonction de la nature du circuit magnétique (géométrie, entrefer, fuites,...) et de l'induction maximale dont il est le siège, ainsi que le relevé à l'aide de l'oscilloscope d'un cycle d'hystérésis.

Le circuit magnétique étudié possède une culasse mobile permettant d'obtenir un entrefer variable donc une réluctance variable. Le réglage de l'entrefer se fait au moyen de cales amagnétiques (papier-carton). Les cales sont introduites en soulevant la culasse mobile, on resserre ensuite le circuit.

Toute manipulation de la culasse mobile sera effectuée en supprimant l'alimentation du circuit d'excitation. Soit le circuit magnétique de la figure 1, il est traversé par un flux magnétique  $\Phi$ .

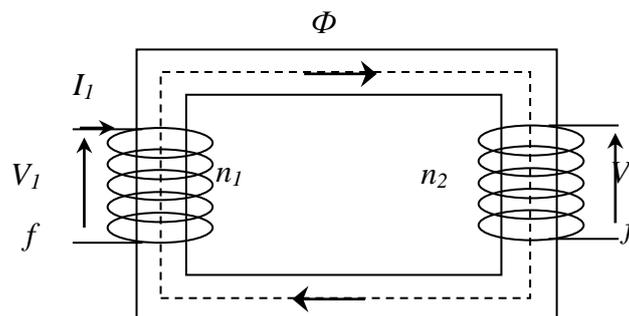


Figure. 7

a. Théorème d'HOPKINSON

$$F = n_1 \cdot I_1 = H \cdot l = \mathcal{R} \cdot \Phi$$

$F$  : La force magnétomotrice (A.t) ;

$I_1$  : Le courant magnétisant (A) ;  
 $n_1$  : Le nombre de spires primaires ;  
 $\mathcal{R}$  : La réluctance du circuit magnétique.

b. Formule de **BOUCHEROT**:

$$V_2 = 4,44 \cdot n_2 \cdot B_m \cdot f \cdot S$$

$V_2$  : La tension efficace (V) ;  $n_2$  : Le nombre de spires ;  $B_m$  : L'induction maximale (T) ;  $S$  : La section du circuit magnétique ( $m^2$ ) ;  $f$  : La fréquence du signal d'alimentation (Hz).

c. Réaliser le montage suivant :

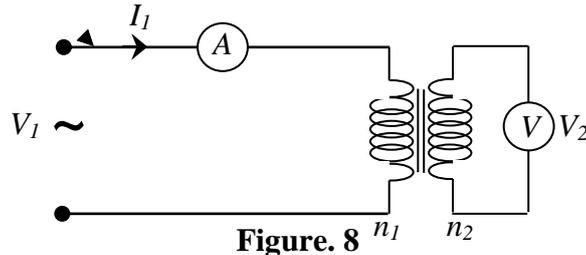


Figure. 8

**II- 2 Entrefer constant (sans cales) :**

- Mesurer l'évolution du courant magnétisant en fonction de l'induction  $B_m$  (mesuré à partir de l'indication  $V$ ), en remplissant le tableau suivant ;
- Calculer la réluctance  $\mathcal{R}$  du circuit magnétique dans cette configuration pour  $0.5 T$  ;
- Tracer  $F=f(B_m)$ , la tension est variable et le courant maximum est de  $4 A$  pour  $I_1$ .

$I_1$ (A)								
$V_2$ (V)								
$F$ (A.t)								
$B_m$ (T)								
$H$ (A.t/m)								

**II- 3 Entrefer variable (en introduisant des cales)**

- Mesurer pour les divers entrefers ainsi réalisés, l'intensité du courant magnétisant nécessaire pour avoir une induction de  $0.5 T$ .
- Tracer  $F(\delta)$ .

**II- 4 Entrefer constant (avec cales)**

- Choisir une valeur de l'entrefer de manière à limiter le courant à  $4A$ . Pour cet entrefer, mesurer la variation du courant magnétisant en fonction de l'induction.
- Tracer  $F(B_m)$  sur le même graphique que pour un entrefer nul.

**II- 5 Cycle d'hystérésis**

Réaliser le circuit de la figure 9, avec un shunt de  $1 \Omega$  pour le courant (image de  $H$ ) et un intégrateur pour l'induction  $B$ .

Pour tracer le cycle d'hystérésis, visualisé le courant et l'induction (aux bornes de l'intégrateur). On passe en position *Lissajous*, tracer le cycle d'hystérésis.

Aux bornes du shunt, on a une chute de tension qui est l'image du courant magnétisant donc le champ d'excitation magnétique  $H$ . Aux bornes de l'intégrateur, on a une tension qui est l'image de l'induction  $B$ .

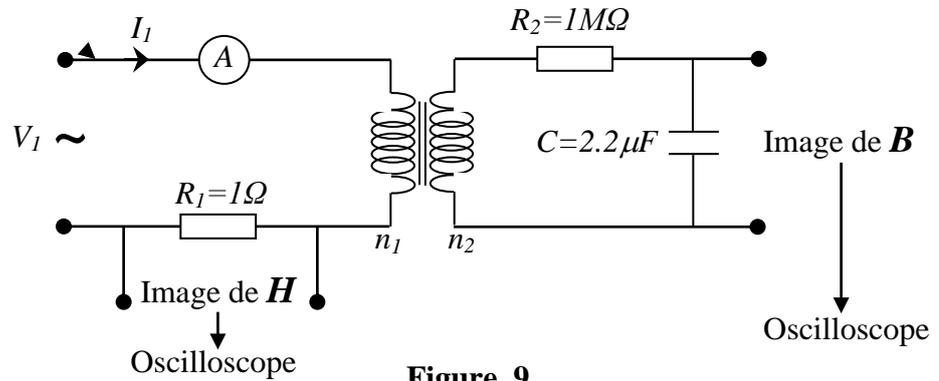


Figure. 9

**Remarque :** Caractéristiques du circuit magnétique ( voir figure 10)

- Section effective du fer  $S=29 \times 30 \text{ mm}^2$  ;
- Nombre de spires de l'enroulement d'excitation (primaire)  $n_1=300$  spires ;
- Nombre de spires de l'enroulement secondaire  $n_2=600$  spires.

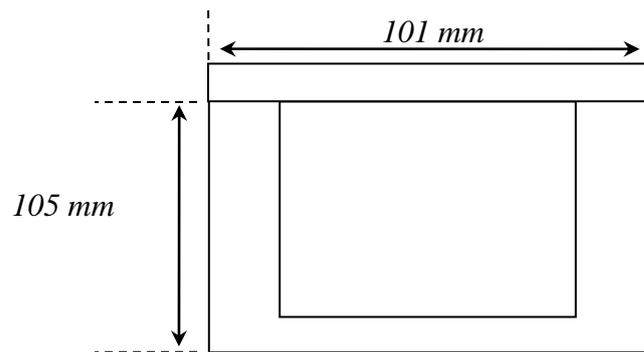


Figure. 10

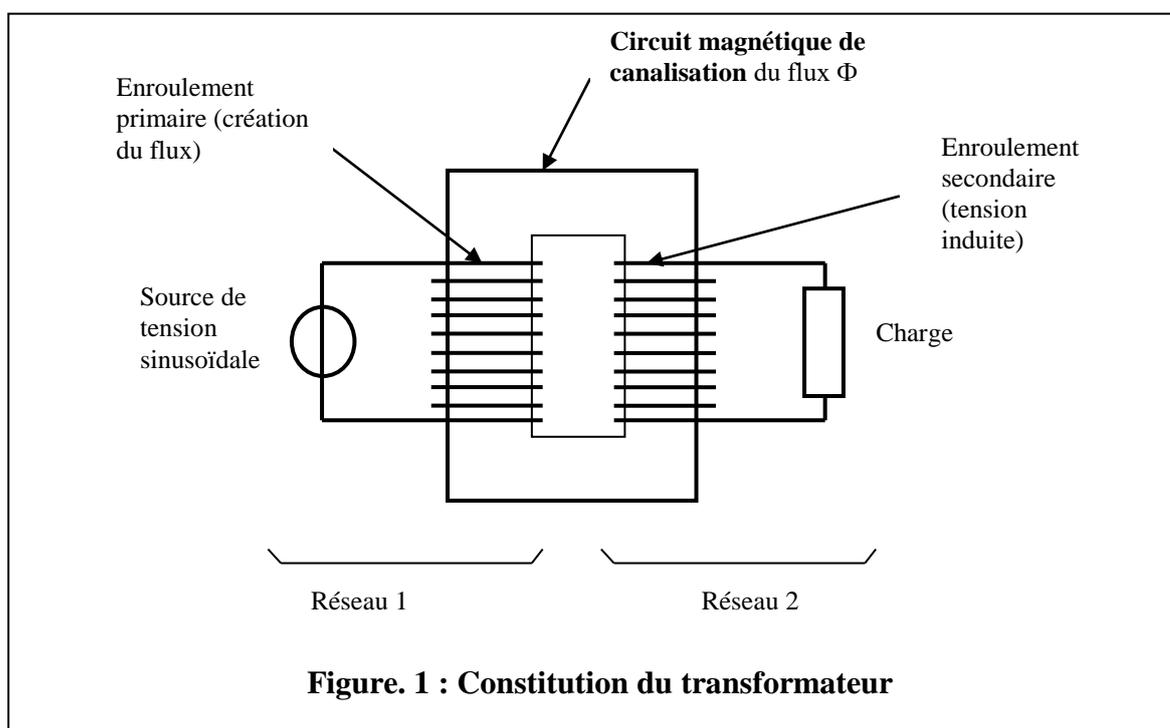
## **TP05 : Transformateur (Partie I)**



**I- Rappel théorique**  
**I- 1 Définitions**  
**I- 1- 1 Transformateur**

Le transformateur est une machine électrique statique permettant de transférer l'énergie électrique en adaptant les niveaux de tension (de nature sinusoïdale) et de courant entre deux réseaux de même fréquence. Il est constitué de deux parties électriques isolées, l'enroulement primaire et le secondaire, lié magnétiquement par un circuit magnétique (Fig. 1).

Pour des impératifs de fabrication et d'efficacité la réalisation pratique donne à ce dernier une autre forme : circuit magnétique cuirassé et bobinages concentriques. Le premier enroulement fait d'un conducteur de diamètre plus grand que celui du conducteur utilisé pour le second enroulement.



Les transformateurs ont une large utilisation dans l'industrie, tel que :  
 Pour les lignes de transport de l'énergie ; pour la soudure à l'arc électrique ou par point ; pour la brasure ; pour les tubes à néon ; pour les lampes baladeuses ; pour l'électronique faible et de puissance...etc.

**I- 1- 2 Notations et symbolisation**

On adopte différentes notations suivants les parties du transformateur que l'on décrit :

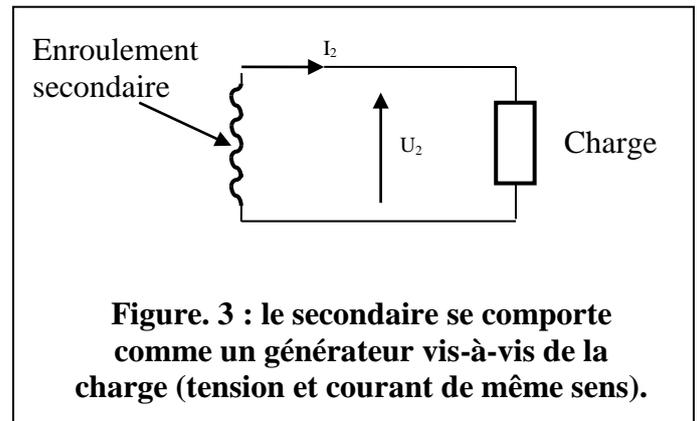
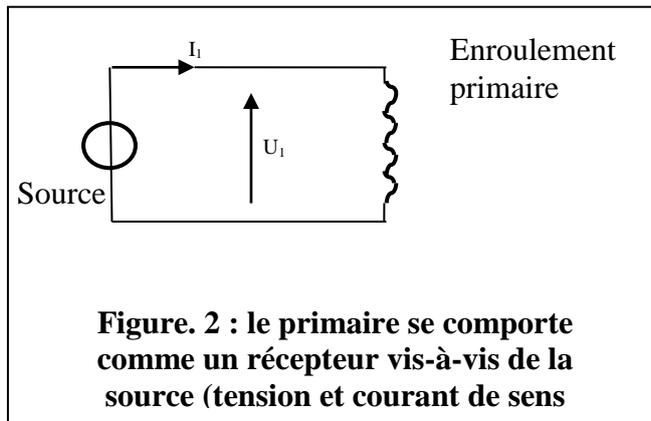
Primaire : indice 1 ; secondaire : indice 2 ;

Grandeurs à vide : indice 0 ; grandeurs nominales : indice n ;

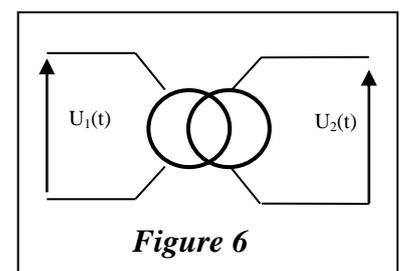
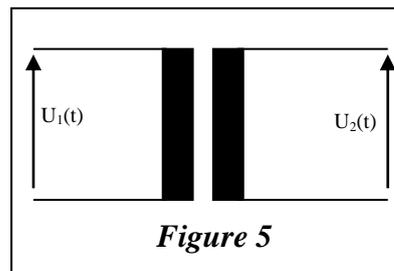
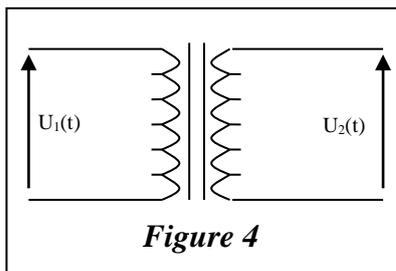
Grandeurs en court-circuit : indice cc.

C'est le courant primaire qui impose le sens positif du flux dans le circuit

magnétique. Le marquage des tensions et des courants traduit le sens de transfert de l'énergie.

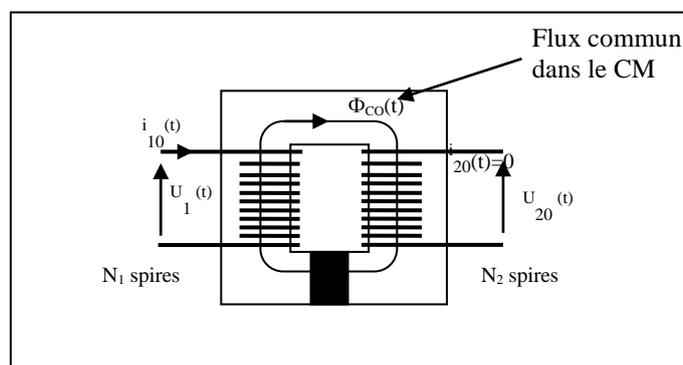


Les figures suivantes représentent les symboles des transformateurs les plus souvent rencontrés :



### I- 1-3 Fonctionnement à vide

Le transformateur comporte deux enroulements de résistance  $r_1$  et  $r_2$  comportant  $N_1$  ou  $N_2$  spires (Fig. 7). Le primaire reçoit la tension  $u_1(t)$  et absorbe le courant  $i_{10}(t)$ . Le secondaire délivre la tension  $u_{20}(t)$  et un courant  $i_{20}(t)$  nul puisqu'il est à vide. Le flux  $\Phi_1(t)$  créé par l'enroulement primaire se décompose en un flux de fuite au primaire  $\Phi_{f1}(t)$  auquel s'ajoute le flux commun  $\Phi_{CO}(t)$  dans le circuit magnétique.



**Figure. 7 : Notations autour du transformateur à vide**

Equations des tensions :

Le comportement du primaire est le suivant :

$$u_1 = r_1 \cdot i_{10} + N_1 \cdot \frac{d\phi_1}{dt} = r_1 \cdot i_{10} + I_{f1} \cdot \frac{di_{10}}{dt} + N_1 \cdot \frac{d\phi_{co}}{dt}$$

Le schéma équivalent (Fig. 8) est identique à la différence de l'insertion d'un transformateur parfait (Fig. 9) en parallèle avec les éléments de magnétisation et des pertes fer

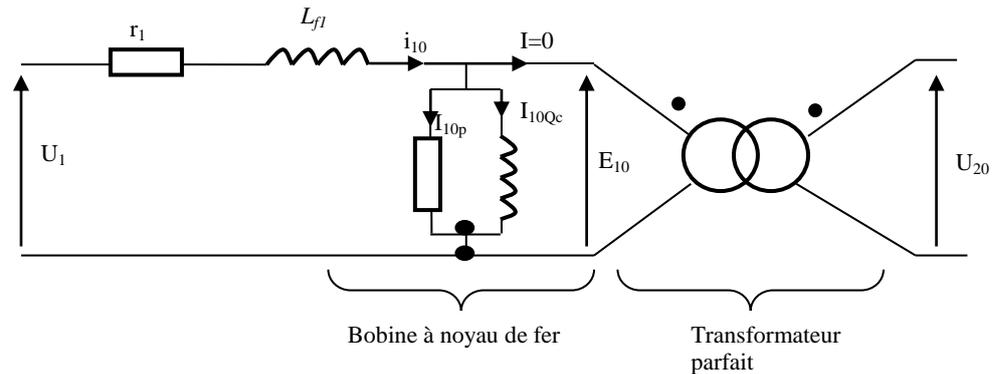


Figure 8 : schéma équivalent (c'est celui d'une bobine à noyau de fer).

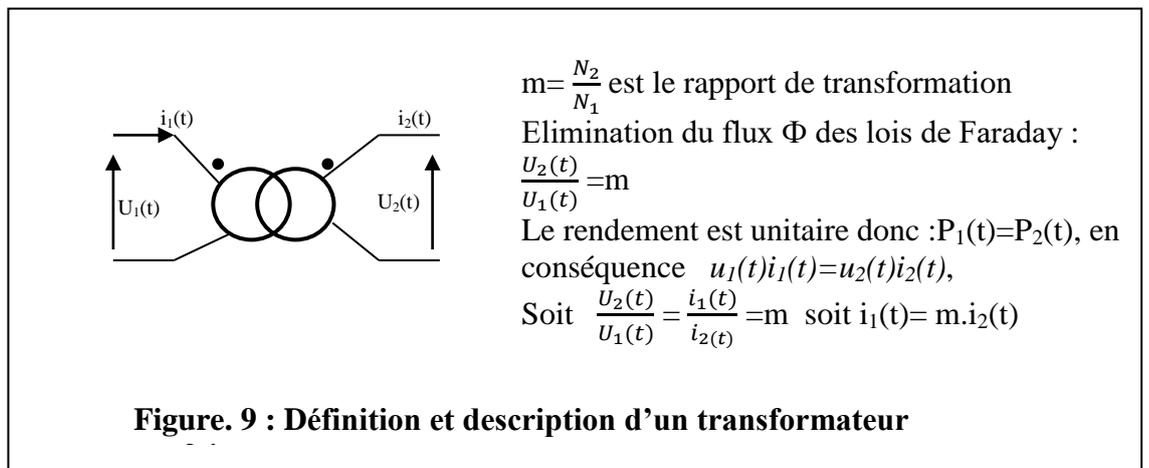


Figure. 9 : Définition et description d'un transformateur

Puisque c'est un élément de transfert d'énergie, l'étude du transformateur nécessite d'effectuer un bilan des puissances mises en jeu dans le but de déterminer le rendement.

A vide, le transformateur absorbe une puissance active  $P_{10}$  et une puissance réactive  $Q_{10}$ . Pour effectuer le bilan des puissances, on utilise le théorème de Boucherot.

$$P_{10} = r_1 \cdot I_{10}^2 + \frac{E_{10}^2}{R_\mu}$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} r_1 \cdot I_{10}^2 : \text{Pertes Joules dans la résistance de l'enroulement primaire.} \\ \frac{E_{10}^2}{R_\mu} = R_\mu \cdot I_{10\mu}^2 : \text{Pertes fer dans le circuit magnétique.} \end{array} \right.$$

On peut aussi écrire :  $P_{10} = U_{10} \cdot I_{10} \cdot \cos \varphi_{10}$  ; où  $\cos \varphi_{10}$  est le facteur de puissance à vide.

$$Q_{10} = L_{f1} \cdot \omega \cdot I_{10}^2 + \frac{E_{10}^2}{L_\mu \cdot \omega}$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{f1} \cdot \omega \cdot I_{10}^2 : \text{Puissance réactive de fuite dans l'enroulement primaire.} \\ \frac{E_{10}^2}{L_\mu \cdot \omega} = L_\mu \cdot \omega \cdot I_{10Q}^2 : \text{Puissance magnétisante du circuit magnétique.} \end{array} \right.$$

On peut aussi écrire :  $Q_{10} = U_{10} \cdot I_{10} \cdot \sin \varphi_{10}$  .

## II- Partie pratique

### II- 1 But de la manipulation

Etude de la constitution et du fonctionnement d'un transformateur monophasé. Plus proche des considérations pratiques, ce TP traite des procédés expérimentaux de détermination des éléments du schéma équivalent par les essais à vide, en charge et en court-circuit et la détermination pratique des éléments d'exploitation du transformateur ( caractéristiques externes).

### II- 2 Essai à vide :

a. Réaliser le schéma du montage suivant :

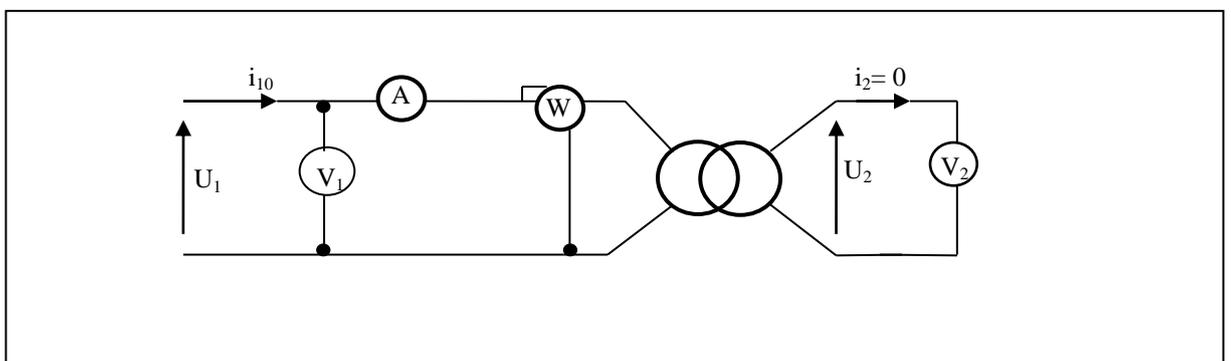


Figure. 10

Lors d'un essai à vide, les courants et par conséquent les pertes Joule, sont faibles. On mesure les tensions primaire et secondaire à l'aide de voltmètres supposés parfaits (impédance infinie), le courant primaire (ampèremètre impédance nulle) et la puissance absorbé au primaire.

Détermination des pertes fer matérialisées par la  $R_\mu$  pour un transformateur réel :

$$P_{10} = P_{j10} + P_{fer}$$

- On a  $I_{10} \ll I_{1n}$  donc  $P_{j10} \ll P_n$  ;
- La fréquence  $f$  et la fem  $E_1 = U_1$  sont constantes donc l'induction  $B$  est constante.

(Formule de Boucherot :  $U_1 = 4.44.f.B.N_1.S$  ;  $S$  : section du circuit magnétique).

Par conséquent les pertes fer restent constantes et  $P_{j10} \ll P_{fer}$ .

- Donc :  $P_{10} \approx P_{fer}$  ;

$$P_{10} = \frac{U_1^2}{R_\mu} = P_{fer}$$

Quel que soit le modèle utilisé, les pertes mesurées à vide représentent les pertes fer du transformateur ( $P_{10} \approx P_{fer}$ ). Ces dernières ne dépendent que de la fréquence et de la tension primaire, constantes en utilisation industrielle.

3-2) Relever des résultats : Au cours de cet essai, le secondaire sera ouvert. A l'aide de l'alimentation variable varier progressivement  $U_{10}$  de  $U_{1min}$  jusqu'à  $U_{1max}$  .et relever pour chaque valeur de  $U_{10}$  les valeurs des paramètres  $I_{10}, U_{20}$  et  $P_{10}$ .

On se place au régime nominal pour relever les grandeurs suivantes :

Tension primaire  $U_{10} = U_{1n}$  avec  $V_1$  ;

Tension secondaire  $U_{20} = U_2$  avec  $V_2$  ;

Courant primaire à vide  $I_{10}$  qui n'est autre que le courant magnétisant  $I_\mu$  avec  $A$  ;

La puissance primaire  $P_{10}$  avec  $W$ .

Remplir le tableau des valeurs suivant.

En déduire le rapport de transformation  $m_0$  . avec  $m_0 = U_{20}/U_{10}$

$U_{10}(V)$	$I_{10}(A)$	$U_{20}(V)$	$P_{10}(W)$	$P_{fer}(W)$	$m_0$
30					

Tracer le même graphe :  $U_{10} = f(I_{10})$  et  $P_{fer} = f(U_1)$ .

## II- 3 Essai en court circuit

- a. Réaliser le schéma du montage suivant

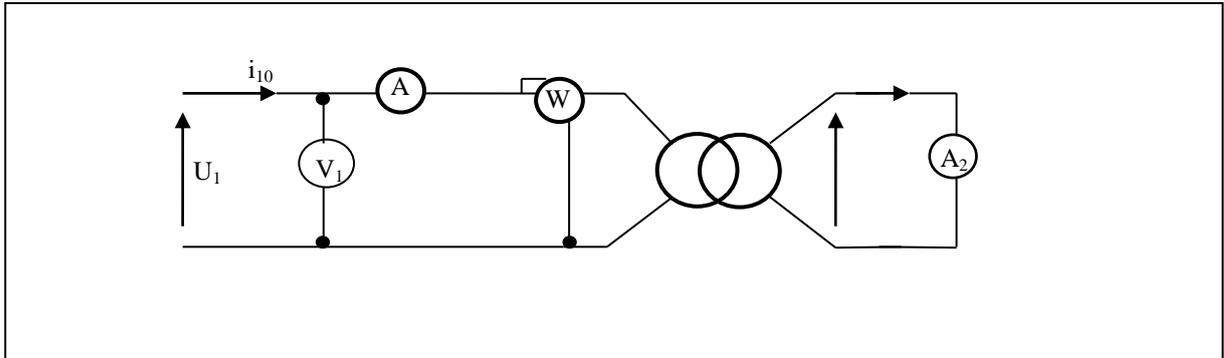


Figure. 11

Dans un essai avec secondaire en court circuit, il faut limiter la tension primaire pour se placer au régime nominal de courant au secondaire. Dans ces conditions, les tensions sont faibles. Le secondaire est fermé sur un ampèremètre.

Pour amener le courant secondaire à la valeur nominale, la tension primaire est réglée avec un Autotransformateur. On mesure la tension primaire à l'aide d'un voltmètre supposé parfait (impédance infinie), les courants primaire et secondaire (ampèremètres d'impédance nulle) et la puissance absorbée au primaire (Fig. 11).

Pour un transformateur réel on a :

$$P_{1cc} = r_1 \cdot I_{1cc}^2 + r_2 \cdot I_{2cc}^2 + P_{fercc}$$

Or les pertes fer dépendent de la tension primaire qui est ici très faible : les pertes  $P_{fercc}$  sont négligeables devant les autres.

En conclusion :

$$P_{1cc} \approx r_1 \cdot I_{1cc}^2 + r_2 \cdot I_{2cc}^2 = r_1 \cdot I_{1n}^2 + r_2 \cdot I_{2n}^2 = P_{jn}$$

Puisque on se place au régime nominal de courant, les pertes mesurées en court circuit sont les pertes Joule nominales, appelées aussi pertes cuivre car elles concernent uniquement la dissipation de puissance dans les conducteurs électriques.

- b. Relever des résultats : faire varier lentement la tension primaire  $U_{1cc}$  tout en tenant compte de  $I_{2cc}$  (courant de court circuit).
- c. On relève les grandeurs suivantes :
  - Tension primaire  $U_{1cc}$  avec  $V$ .
  - Courant primaire  $I_{1cc}$  avec  $A_1$ , essentiellement pour contrôler le courant dans le wattmètre et éviter de dépasser le calibre courant de cet appareil ;
  - Courant secondaire  $I_{2cc}$  avec  $A_2$ .
  - La puissance primaire  $P_{1cc}$  avec  $W$ .
- d. Relever les valeurs de  $U_{1cc}$ ,  $I_{1cc}$ .
- e. Remplir le tableau suivant :

## TP 05 : Transformateur (partie I)

---

$I_{2cc}(A)$	$I_{1cc}(A)$	$U_{1cc}(V)$	$P_{1cc}(W)$	$I_{1cc}/I_{2cc}$	$m$
0.5					
1.0					
1.5					
2.0					
2.4					

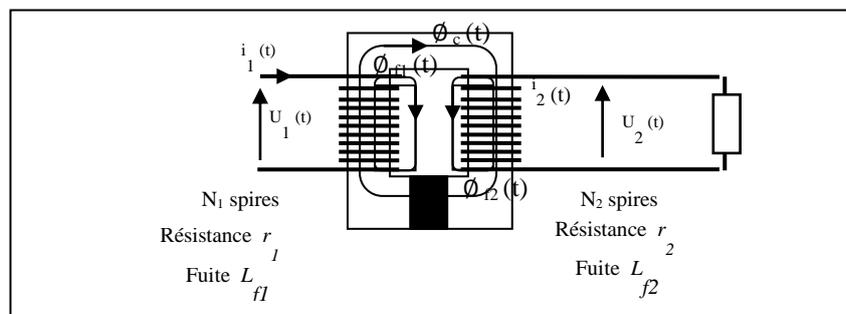
- f. Tracer le graphe  $U_{1cc} = f(I_{2cc})$ . Pour  $\cos \varphi_2 = 1$   
g. Calculer le rapport  $(I_{1cc}/I_{2cc})$  et le comparer à  $m_0$ .

## **TP06 : Transformateur (Partie II)**



**I- Rappel théorique**  
**I- 1 Définitions**  
**I- 1-1 Fonctionnement en charge**

La présence d'un courant dans le bobinage secondaire a pour effet l'existence d'un flux de fuite  $\Phi_{f2}$  émanant de cet enroulement et nécessite la prise en compte de la résistance du secondaire



**Figure. 1 : Notations autour du transformateur en charge**

Equation des flux :

Flux total embrassé par les  $N_1$  spires du primaire :  $\Phi_1 = N_1 \cdot (\Phi_c + \Phi_{f1})$ .

Flux total embrassé par les  $N_2$  spires du secondaire :  $\Phi_2 = N_2 \cdot (\Phi_c - \Phi_{f2})$ .

Les équations définissant ce circuit sont :

Pour les tensions on a :

$$U_1 = r_1 \cdot i_1 + N_1 \cdot \frac{d\Phi_1}{dt} = r_1 \cdot i_1 + L_{f1} \cdot \frac{di_1}{dt} + N_1 \cdot \frac{d\Phi_c}{dt}$$

$$U_2 = -r_2 \cdot i_2 + N_2 \cdot \frac{d\Phi_2}{dt} = -r_2 \cdot i_2 - L_{f2} \cdot \frac{di_2}{dt} + N_2 \cdot \frac{d\Phi_c}{dt}$$

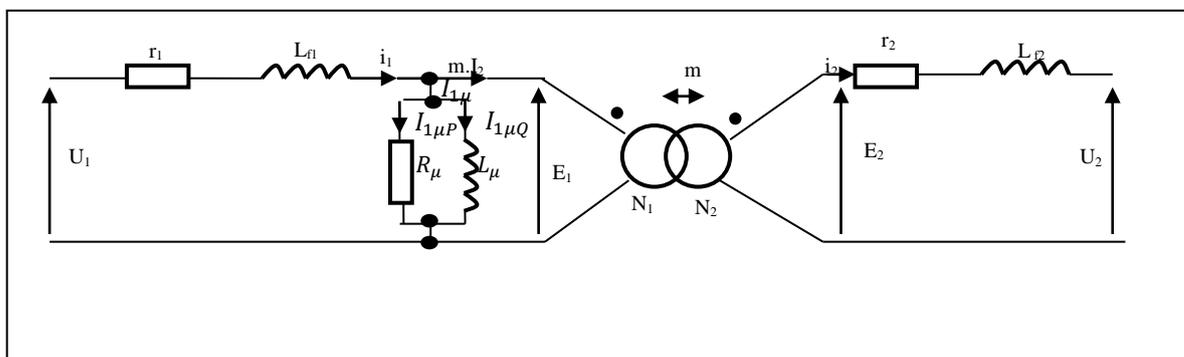
Pour les courants on a :

Le flux  $\Phi_c(t)$  est créé par le champ d'excitation magnétique  $h(t)$  dans le circuit magnétique.

Théorème d'Ampère sur la ligne moyenne  $l$  :  $N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2 = h \cdot l = F$

On identifie cette F.m.m  $F$  à celle créée par un courant  $i_{1\mu}$  dans le primaire du transformateur lorsqu'il est à vide (c'est ce que l'on observe pratiquement :  $i_{1\mu} \approx i_{10}$ )

Donc :  $N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2 = N_1 \cdot i_{1\mu}$



**Figure. 2**

L'analyse de ces relations permet de définir le rapport de transformation :  $m =$

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}$$

Au schéma équivalent à vide vient s'ajouter l'influence des éléments du secondaire. On définit alors le schéma équivalent complet du transformateur en charge (Fig. 2).

Pour terminer, on peut envisager le bilan de toutes les puissances, actives ou réactives, qui apparaissent dans le transformateur (Fig. 3)

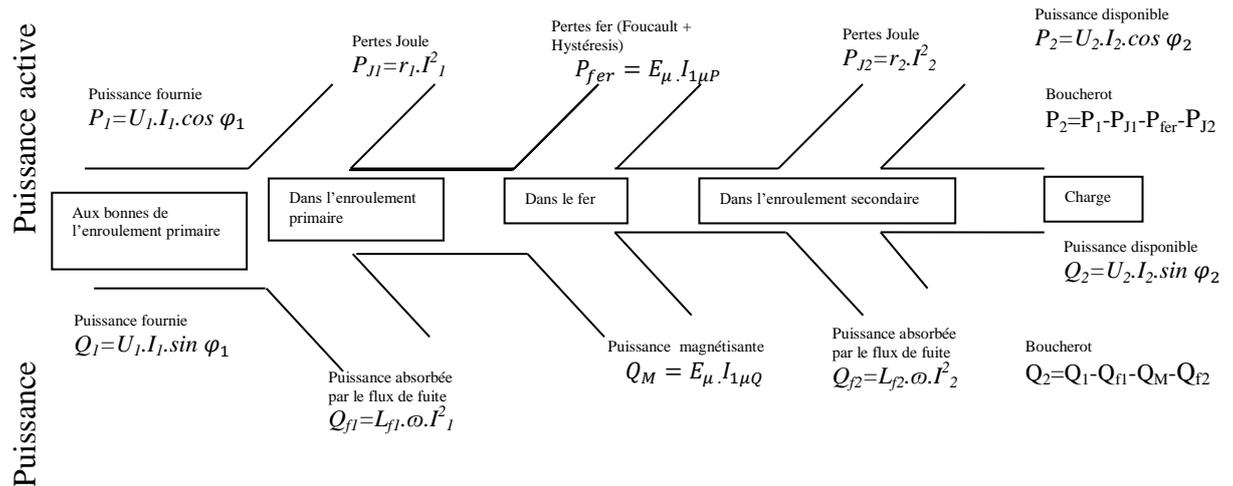


Figure. 3 : Arbre des puissances du transformateur en charge

### I- 1- 2 Rendement du transformateur

Le transformateur est un élément essentiel de la chaîne de distribution de l'énergie électrique pour des réseaux de très grande puissance.

Dans la recherche d'une optimisation des coûts, il est nécessaire de connaître le rendement du transformateur.

Le rendement d'un appareil est le rapport de la puissance restitué à la puissance fournie.

pour le transformateur:  $\eta = \frac{\text{puissance disponible au secondaire}}{\text{puissance totale absorbée au primaire}} = \frac{P_2}{P_1}$

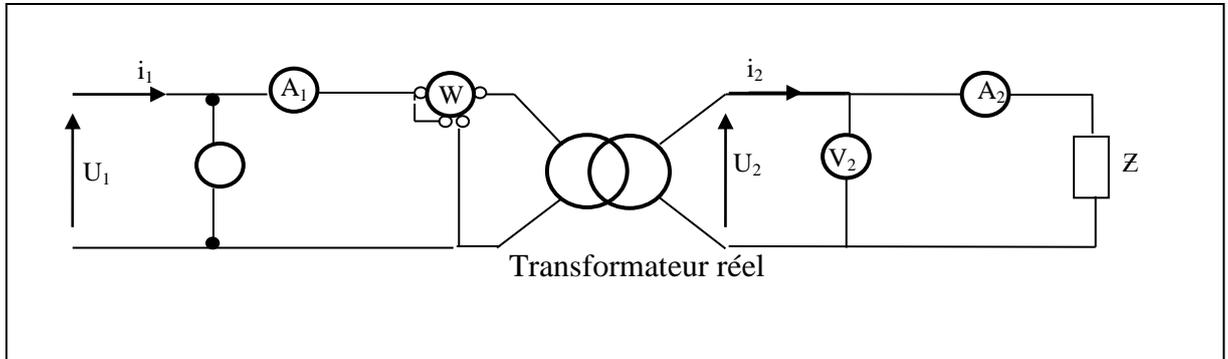
$$\left. \begin{aligned} P_2 &= U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 \\ P_1 &= P_2 + P_{J2} + P_{fer} = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + R_2 \cdot I_2^2 + P_{fer} \end{aligned} \right\}$$

donc:  $\eta = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + R_2 \cdot I_2^2 + P_{fer}}$

En résumé le rendement est maximal lorsque les pertes fer et les pertes Joule sont identiques.

**II- Partie pratique**  
**II- 1 Essai en charge**

a. Réaliser le schéma du montage suivant :



**Figure. 4 : Essai en charge d'un transformateur**

b. Remplir le tableau suivant :

$I_2$ (A)	$I_1$ (A)	$U_2$ (V)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\cos \varphi_1$	$P_J$ (W)	$P_f$ (W)	$\eta$ (%)
0								
0.4								
0.6								
1.0								
1.4								
1.8								
2.2	3A							

c. Tracer sur le même graphe les fonctions suivantes :  $U_2 = f(I_2)$  ;  $\eta = f(I_2)$  et  $\cos \varphi_1 = f(I_2)$ , pour  $\cos \varphi_2 = 1$ .

**Conclusion :**

La démarche expérimentale consiste à mesurer la puissance à vide, c'est-à-dire les pertes fer, et la puissance en court-circuit, c'est-à-dire les pertes cuivre. Ces deux seuls essais, simples à mettre en œuvre suffisent à déterminer la tension secondaire en charge et le rendement du transformateur.

En utilisant les résultats des essais :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 \cdot I_{2n} \cdot \cos \varphi_2}{U_2 \cdot I_{2n} \cdot \cos \varphi_2 + P_{1cc} + P_{10}}$$

# **Bibliographie**

## Bibliographie

- [1] L. Lasne. " Electrotechnique et énergie électrique". Edition Dunod, 2013.
- [2] T. Neffati. " Electricité générale analyse et synthèse des circuits". Edition Dunod, 2008.
- [3] B. Laporte. " Machines électriques tournantes ". Edition Ellipses, 2007.
- [4] G. Chateigner, M. Boïs, D. Bouix, J. Vaillant et D. Verkindère. " Manuel de génie électrique ". Edition Dunod, 2007.
- [5] P. Mayé. " Aide-mémoire électrotechnique". Edition Dunod, 2006.
- [6] B. Laporte. " Machines électriques tournantes ". Edition Ellipses, 2007.
- [7] A. Benoudjit. " Introduction aux machines électriques". Presses de l'université de Batna.1995.
- [8] G. Séguier et F. Notelet. " Electrotechnique industrielle". Technique et Documentation (Lavoisier).1987.
- [9] A. Fouillé et C. Naudet. " Electrotechnique à l'usage des ingénieurs Tome 2 machines électriques à courant alternatifs". Edition Dunod, 1980.
- [10] B. Saint-Jean. " Electrotechnique et machines électriques ". Edition Eyrolles, 1977.