



LE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

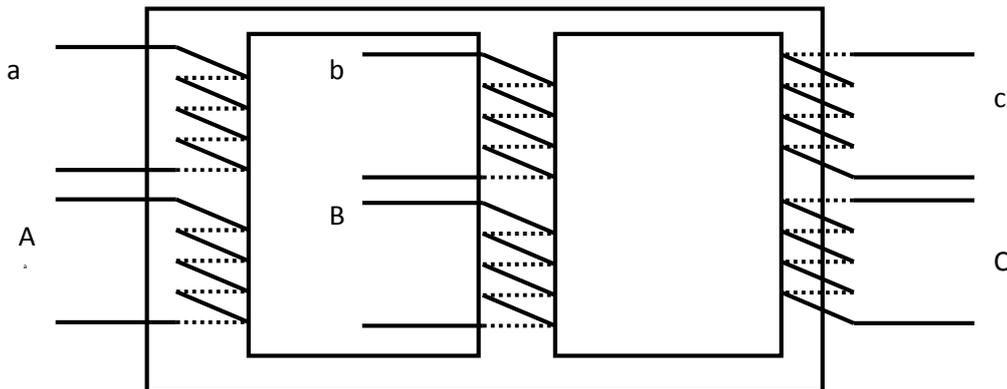


1. Constitution et principe de fonctionnement :

Un transformateur triphasé doit être considéré comme l'assemblage de **trois** transformateurs **monophasés** : chaque **colonne** représente un transformateur ayant N_1 spires au primaire et N_2 spires au secondaire. En conséquence, tout ce qui a été dit au sujet du transformateur monophasé (théorie, diagrammes à vide et en charge) s'applique à chacune des phases du transformateur triphasé.

Un transformateur triphasé comporte **6 bobines** situées dans un même circuit magnétique :

- 3 bobines identiques au primaire
- 3 bobines identiques au secondaire



A, B et C représente les trois enroulements du primaire
a, b et c représente les trois enroulements du secondaire

2. Couplage des enroulements :

Tant au primaire qu'au secondaire, les enroulements peuvent être couplés en triangle (**D**), en étoile (**Y**) ou en zig-zag (**Z**). Ce dernier couplage est obtenu en divisant chaque enroulement en **deux** bobines et en les mettant en **série** (dans le sens contraire) **deux demi-bobines** prises sur des noyaux différents pour réaliser chaque phase. On représente par une lettre **majuscule** l'enroulement **haute tension** et par une lettre **minuscule** l'enroulement **basse tension**. Ainsi on distingue les **couplages** suivants:

- **YY** → primaire couplé en **étoile**, secondaire couplé en **étoile**
- **YD** → primaire couplé en **étoile**, secondaire couplé en **triangle**
- **DD** → primaire couplé en **triangle**, secondaire couplé en **triangle**
- **DY** → primaire couplé en **triangle**, secondaire couplé en **étoile**
- **YZ** → primaire couplé en **étoile**, secondaire couplé en **zig-zag**
- **DZ** → primaire couplé en **triangle**, secondaire couplé en **zig-zag**

3. Etude à vide :

La puissance absorbée à vide représente les pertes fer. On retiendra deux rapports de transformation : le rapport de transformation **simple** (ou par colonne) et le rapport de transformation **composé** (ou **global**).

3.1. Rapport de transformation simple m (ou par colonne) :

C'est le rapport entre une tension secondaire simple à vide V_{20} et une tension primaire simple V_1 . C'est aussi le rapport entre le nombre de spires par enroulement du secondaire et le nombre de spires par enroulement du primaire : $m = \frac{V_{20}}{V_{10}} = \frac{N_2}{N_1}$

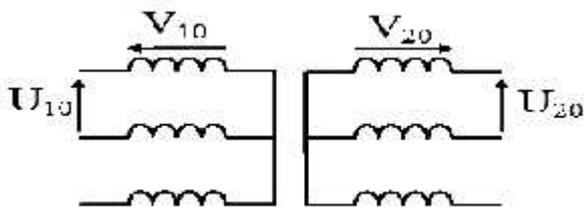
3.2. Rapport de transformation composé M:

C'est le rapport entre une tension composée secondaire et une tension composée primaire :

$$M = \frac{U_{20}}{U_{10}}$$

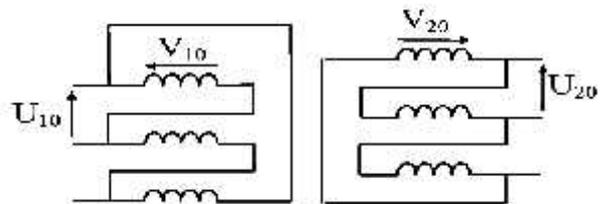
3.3. Relation entre M et m :

Couplage : Yy



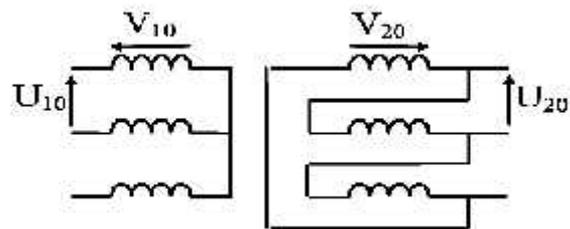
$$M = \frac{U_{20}}{U_{10}} = \frac{V_{20} \sqrt{3}}{V_{10} \sqrt{3}} = m \text{ donc } M = m$$

Couplage : Dd



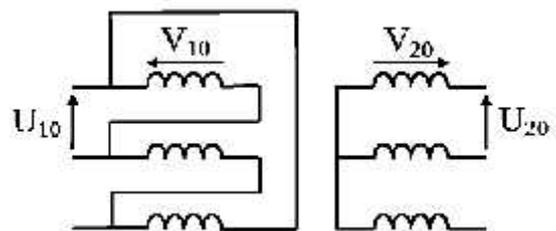
$$M = \frac{U_{20}}{U_{10}} = \frac{V_{20}}{V_{10}} = m \text{ donc } M = m$$

Couplage : Yd



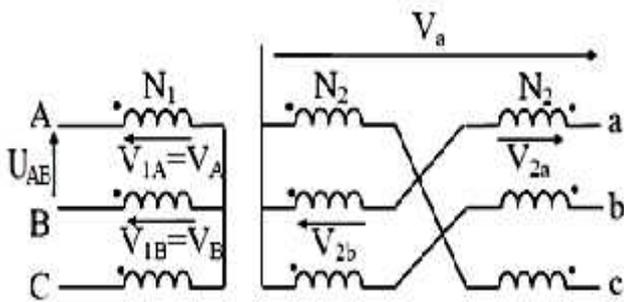
$$M = \frac{U_{20}}{U_{10}} = \frac{V_{20}}{V_{10} \sqrt{3}} = \frac{m}{\sqrt{3}}, \text{ donc } M = \frac{m}{\sqrt{3}}$$

Couplage : Dy



$$M = \frac{U_{20}}{U_1} = \frac{V_{20} \sqrt{3}}{V_1} = m \sqrt{3} \text{ donc } M = m \sqrt{3}$$

Couplage : Yz

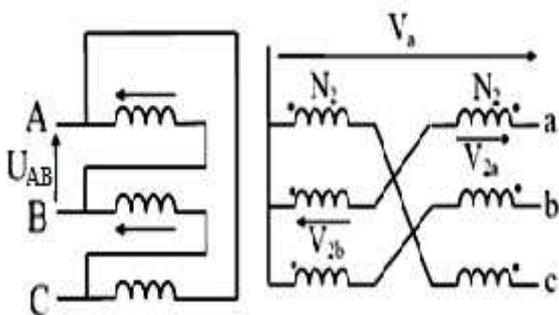


$$M = \frac{U_{ab}}{U_{AB}} = \frac{(V_{2a} - V_{2b}) \sqrt{3}}{U_{AB}} = \frac{(\frac{V_a}{2} - \frac{V_b}{2}) \sqrt{3}}{U_{AB}}$$

$$M = \frac{(\frac{mV_A}{2} - \frac{mV_B}{2}) \sqrt{3}}{U_{AB}} = \frac{(V_A - V_B) \frac{m \sqrt{3}}{2}}{U_{AB}}$$

$$M = \frac{U_{AB} \times \frac{m \sqrt{3}}{2}}{U_{AB}} = \frac{3m}{2}$$

Couplage : Dz



$$M = \frac{U_{ab}}{U_{AB}} = \frac{(V_{2a} - V_{2b}) \sqrt{3}}{U_{AB}} = \frac{(\frac{V_a}{2} - \frac{V_b}{2}) \sqrt{3} \times 3}{U_{AB}}$$

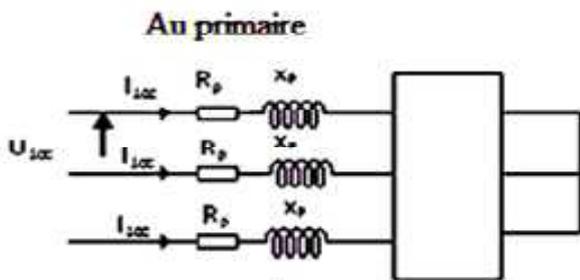
$$M = \frac{(\frac{m \times 3V_A}{2} - \frac{m \times 3V_B}{2}) \sqrt{3}}{U_{AB}} = \frac{(V_A - V_B) \frac{m \sqrt{3} \times 3}{2}}{U_{AB}}$$

$$M = \frac{U_{AB} \times \frac{3m}{2}}{U_{AB}} = \frac{3m}{2}$$

4. Etude en court circuit :

Les transferts d'impédance par colonne s'effectuent comme en monophasé.

4.1. Primaire couplé en étoile :

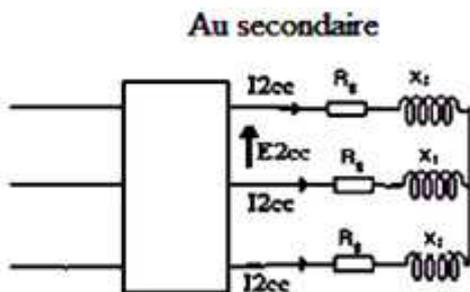


$$F_{1cc} = 3R_p \times I_{1cc}^2$$

De la même manière si le primaire est couplé en triangle on aura

$$F_{1cc} = 3R_p \times I_{1cc}^2 = R_p \times I_{1cc}^2$$

4.2. Secondaire couplé en étoile :



$$F_{1cc} = 3R_s \times I_{2cc}^2$$

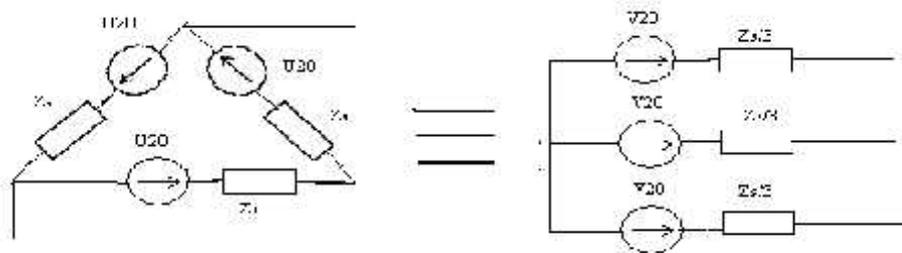
$$Z_s = \frac{E_{2cc}}{I_{2cc}} \text{ avec:}$$

$$-E_{2cc} = m \frac{U_{1cc}}{\sqrt{3}} \text{ si la primaire est couplé en Y}$$

$$-E_{2cc} = m U_{1cc} \text{ si la primaire est couplé en D}$$

Si le secondaire est couplé en triangle, on le ramène en étoile avec la transformation de **KENNELY** :

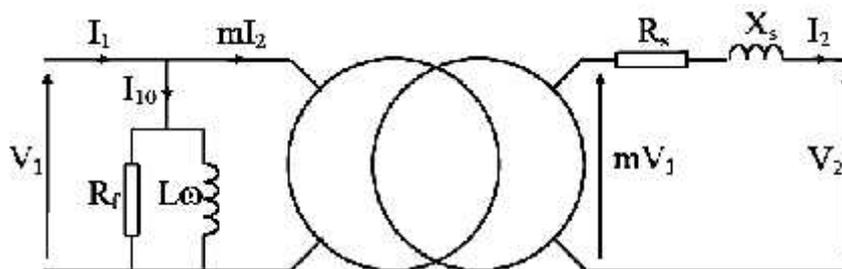
$$Z_{SY} = \frac{Z_{SD}}{3} ; \quad R_{SY} = \frac{R_{SD}}{3} ; \quad X_{SY} = \frac{X_{SD}}{3}$$



5. Etude en charge :

5.1. Calcul de la tension secondaire en charge U_2 :

Quel que soit le couplage réel des enroulements du secondaire, on le ramène en **étoile**. On peut utiliser le schéma représenté ci-dessous, dit "**schéma monophasé équivalent**".



Ainsi, comme pour le transformateur monophasé, on peut calculer une valeur approchée de la chute de tension par colonne et la multipliée par $\sqrt{3}$ pour en déduire la chute de tension entre phase:

$$\Delta U_2 = \Delta V_2 \times \sqrt{3} = (R_s I_2 \cos \varphi_2 + X_s I_2 \sin \varphi_2) \times \sqrt{3}$$

La tension entre phases correspondante sera donnée par : $U_2 = U_{20} - \Delta U_2$

5.2. Rendement :

5.2.1. Méthode indirecte ou méthode des pertes séparées :

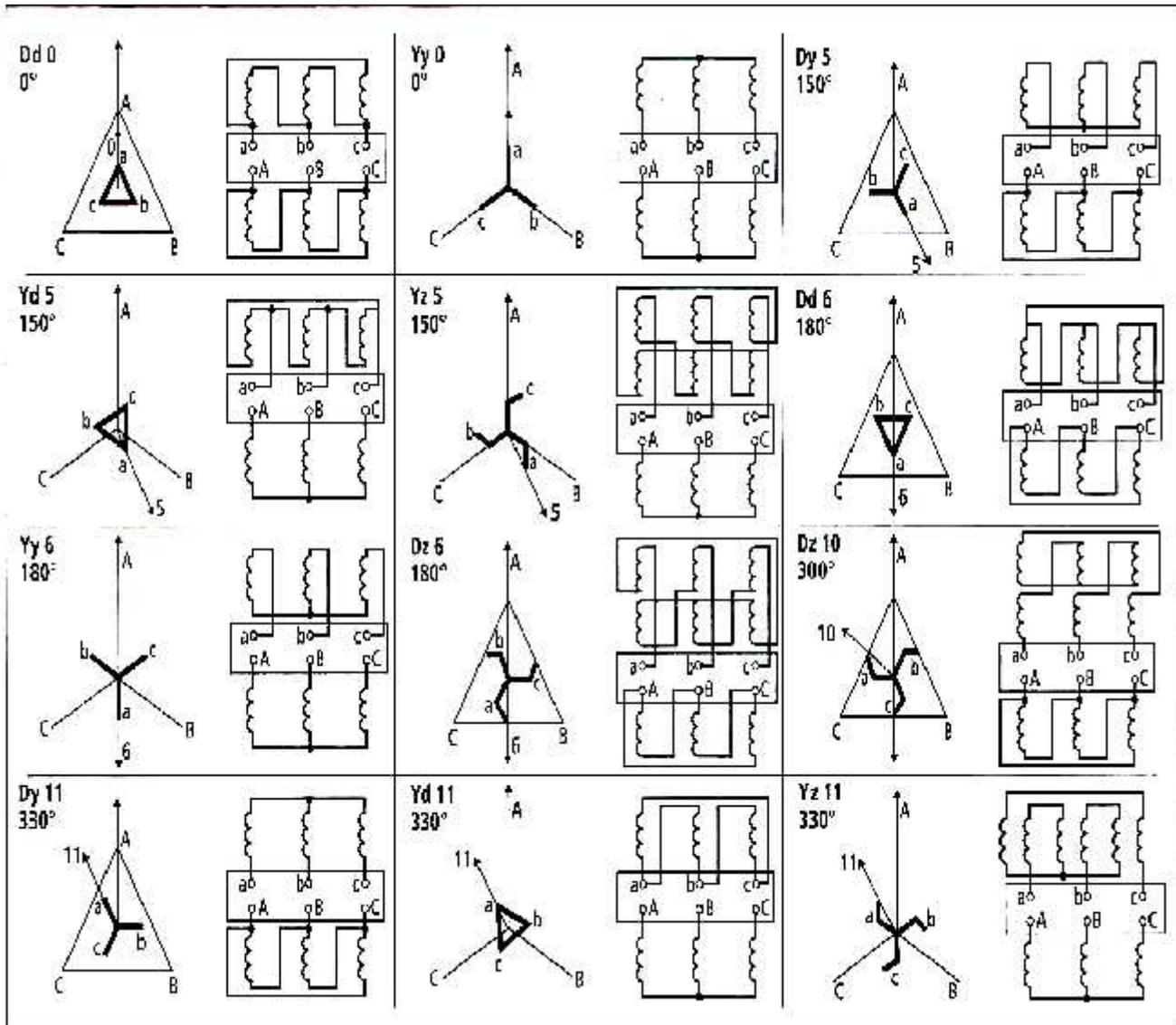
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum \text{pertes}} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2 \sqrt{3}}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 \sqrt{3} + F + C}$$

5.2.2. Rendement maximal :

$$\eta_{max} = \frac{U_2 I_2' \cos \varphi_2 \sqrt{3}}{(U_2 I_2' \cos \varphi_2 \sqrt{3}) + 2F} \quad \text{avec: } I_2' = \sqrt{\frac{F}{3R_s}}$$

6. Indice horaire et déphasage :

Selon les couplages choisis au primaire et au secondaire et selon le sens d'enroulement des bobinages, il existe un **déphasage** des **tensions** du réseau **secondaire** par rapport aux **tensions** du réseau **primaire**. Ce déphasage est un angle multiple de **30°** ou $\pi/6$ rad. A ce déphasage, on associe un nombre variant de **0** à **11** qui est l'**indice horaire** $I = \frac{\theta}{30^\circ}$



SERIE D'EXERCICES SUR LE TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ**Exercice1 :**

Les nombres de spires au primaire et au secondaire d'un transformateur triphasé Yy sont respectivement $N_1 = 4000$ et $N_2 = 76$.

- 1/ Calculer le rapport de transformation simple m . En déduire le rapport de transformation composée M
- 2/ On alimente le primaire sous une tension de $20000V$. Calculer la tension composée U_2 au secondaire
- 3/ La puissance apparente du transformateur étant $S = 140KVA$, calculer les courants de ligne au primaire et au secondaire du transformateur.

Exercice2:

Les essais d'un transformateur Dy ont donné les résultats suivants :

- Essai à vide : $U_{10} = 1500V$; $U_{20} = 400V$; $P_{10} = 300W$
- Essai en court-circuit: $U_{1CC} = 60V$; $I_{2CC} = 50A$; $P_{1CC} = 400W$

- 1/ Pour l'essai à vide calculer le rapport de transformation global M .
 - 2/ Pour l'essai en court circuit calculer les éléments du triangle de Kapp ramenés au secondaire pour une colonne.
 - 3 / Le transformateur alimenté au primaire sous $1500V$ débite sur un récepteur triphasé capacitif de facteur de puissance $0,8$, un courant $I_2 = 50A$.
- a) Déterminer graphique la tension au secondaire du transformateur
 - b) Déterminer le rendement du transformateur

Exercice3

Un transformateur triphasé, alimenté par un réseau triphasé $6600V-50Hz$, délivre aux bornes d'un enroulement secondaire une tension à vide de $225V$

1. Sachant que le primaire est couplé en triangle et le secondaire en étoile, calculer le rapport de transformation à vide, ainsi que la tension secondaire à vide entre phases.
2. En court-circuit sur lui-même, le secondaire débite un courant en ligne $I_{2CC} = I_{2N} = 197,5A$ quand le primaire est alimenté sous une tension de $380V$; il absorbe alors une puissance de $3900W$.
 - 2.1 Calculer R_s , X_s et Z_s respectivement résistance, inductance de fuite et impédance rapportée au secondaire par phase.
 - 2.2 Quelle est la valeur de la puissance apparente nominale si $U_{1N} = 6600V$?
 - 2.3 Déterminer graphiquement pour I_{2N} la valeur de la tension secondaire en charge pour un $\cos\phi$ de $0,85$ AV puis pour un $\cos\phi$ de $0,85$ AR.
3. Ce transformateur alimente une charge équilibré inductive dont le facteur de puissance est de $0,49$; il fournit alors à la charge un courant de ligne de $175A$.
 - 3.1 Quelle est la valeur de la puissance active puis réactive absorbée par le récepteur ?
 - 3.2 Si le récepteur est couplé en triangle, peut-on utiliser la méthode des deux wattmètres pour mesurer la puissance réactive ? Si oui, dites ce que devrait indiquer ce wattmètre

3.3 On veut relever le facteur de puissance à 0,85, quelle est la valeur de la capacité de chacun des condensateurs à coupler en triangle au secondaire pour l'obtenir ? déterminer la nouvelle valeur du courant I_2

Exercice4:

Un transformateur triphasé triangle – étoile a subi deux essais à la fréquence de 50Hz :

- Un essai à vide :
 - Tension primaire $U_{10} = 1200V = U_n$
 - Tension secondaire $U_{20} = 390V$
 - Puissance absorbée à vide $P_{10} = 240W$
- Un essai en court circuit :
 - Tension primaire $U_{1CC} = 27,6V = U_n$
 - Puissance absorbée au primaire $P_{1CC} = 120W$
 - Intensité au secondaire $I_{2CC} = 32,4A$

1.1 Déterminer le rapport de transformation

1.2 Le transformateur absorbe une puissance mesurée par la méthode des deux wattmètres avec $P_A = 17200W$, $P_B = 6800W$ et fonctionne à son maximum de rendement

1.2.1 Que peut – on dire à propos des pertes pour ce fonctionnement ?

1.2.2 Quel est le courant débité par le secondaire ?

1.2.3 Quel est le rendement du transformateur ?

1.3 Ce transformateur alimente trois moteurs asynchrones triphasés :

- Un moteur M1 qui absorbe 7,5KW avec un $\cos\phi$ de 0,85 AR ;
- Un moteur M2 qui absorbe 9KW avec un $\cos\phi$ de 0,9 AR ;
- Un moteur M3 qui absorbe 6,5KW avec un $\cos\phi$ de 0,8 AR ;

Déterminer le facteur de puissance global des trois récepteurs

1.4 Dans ces conditions le transformateur fournit une puissance de 23520W avec un $\cos\phi$ de 0,8 AR

1.4.1 S'il existe une différence entre la puissance active fournie par le transformateur et celle absorbée par les récepteurs, expliquer à quoi elle est due ?

1.4.2 La ligne est elle capacitive ou inductive ?

1.5 Déterminer la capacité de chacun des condensateurs couplés en triangle et placés au primaire, permettant de relever son facteur de puissance à 1.

Exercice5:

Un transformateur triphasé, dont le primaire, couplé en triangle, est alimenté par une tension triphasée 50Hz, de valeur efficace entre phases de 20kV, a le secondaire couplé en étoile avec neutre sorti. Ce transformateur débite dans une installation fonctionnant sous une tension efficace 220/380V, et comprenant :

- 12 moteurs triphasés identiques, ayant chacun une puissance utile de 3KW, un rendement de 0,8 et un facteur de puissance de 0,82 ;

- 90 lampes de 60W, 220V, régulièrement réparties sur les trois phases.
- 1) Pour réaliser l'essai à vide du transformateur, ne disposant pas d'une alimentation de 20kV, on l'alimente du côté secondaire sous 380V entre phases : on relève une puissance de 400W (pour l'ensemble du transformateur) et côté sortie, entre phases, une tension de 19570V.

Déduire de ces mesures :

- a) Le rapport de transformation m , dans le sens normal d'utilisation, pour une colonne ;
 - b) Le nombre de spires d'un enroulement du primaire sachant qu'un enroulement du secondaire comporte 60 spires ;
 - c) Les pertes dans le fer du transformateur (le courant secondaire de l'essai à vide est faible) ; justifier pourquoi on aurait trouvé pratiquement la puissance à vide mesurée sous 20kV entre phases au primaire
- 2) Maintenant, le transformateur branché normalement, primaire sous 20kV entre phases, débite dans l'installation dont tous les appareils fonctionnent ; calculer l'intensité du courant dans un enroulement du secondaire et son déphasage sur la tension.
- 3) Calculer la chute de tension entre phases, l'exprimer en pourcentage.
- 4) Déterminer le rendement du transformateur lorsqu'il débite un courant d'intensité 90A dans l'installation avec un facteur de puissance de 0,85, sachant que les résistances du primaire et du secondaire (mesurées entre phases) sont respectivement $R_1=44$ et $R_2=0,016$. (On supposera que le transformateur est parfait pour les courants).