

LE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

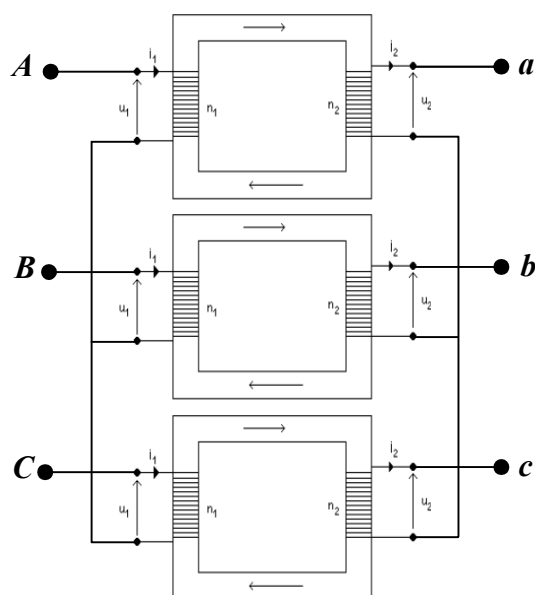
La production, le transport et une importante partie de la distribution de l'énergie électrique sont réalisés en courant alternatif triphasé, nécessitant donc l'utilisation de transformateurs triphasés.

La modélisation du transformateur triphasé sera faite selon la même démarche que pour le transformateur monophasé, et nous verrons qu'en régime triphasé équilibré elle conduit à un schéma monophasé équivalent pratiquement identique à celui du transformateur monophasé.

I. Constitution des transformateurs triphasés

1. Présentation

i. L'utilisation d'un transformateur monophasé sur une phase d'un système triphasé est possible, et par conséquent, l'association de trois transformateurs monophasés, chacun sur une phase, est aussi possible.



Ce type de montage est à flux libre car les 03 circuits magnétiques sont totalement indépendants.

Toutefois, l'utilisation d'un seul transformateur, dit triphasé, avec trois enroulements primaires et trois enroulements secondaires fait gagner en encombrement et en poids de fer utilisé. Les enroulements sont bobinés sur trois noyaux magnétiques complétés ou non par un quatrième et parfois un cinquième noyau servant au retour du flux.

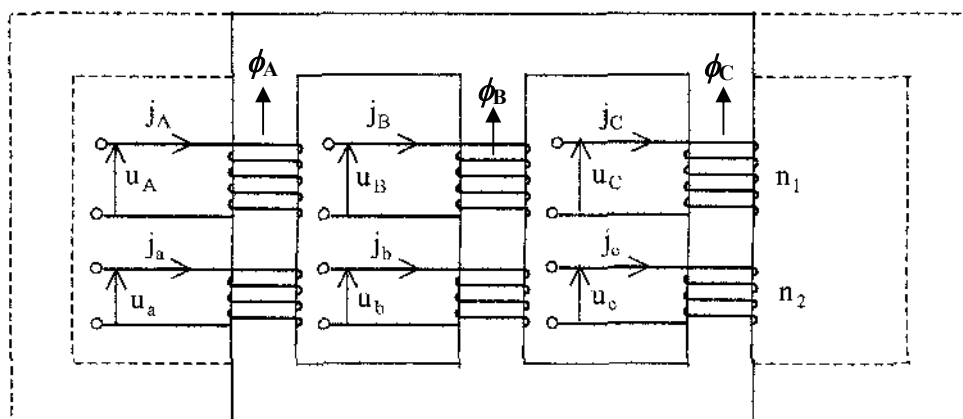


Figure -2

Les éventuels noyaux de retour sont dessinés en trait interrompu. Pour une meilleure compréhension les enroulements ont été représentés dissociés, alors qu'en pratique sur une même colonne ils sont imbriqués afin de réduire les fuites magnétiques. Les tensions et courants d'enroulements sont notés u et J respectivement, avec les indices A, B, C pour le primaire, a, b, c pour le secondaire. Les flux magnétiques communs aux deux enroulements d'une même phase sont notés Φ_A, Φ_B, Φ_C ; on voit qu'en régime déséquilibré si l'égalité $\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0$ n'est pas respectée, le flux résultant se referme:

-dans le cas à 4 ou 5 noyaux, par le ou les noyaux de retour, de réluctance faible; celle structure est dite à flux libre, dans ce cas le flux s'écrit :

$$\phi_A + \phi_B + \phi_C = \phi_T$$

-dans le cas à trois noyaux, dans l'air, de réluctance élevée, d'où il résulte que la somme des trois flux est contrainte d'avoir une valeur faible; cette structure est dite à flux forcé.

2. Les enroulements

i. Mode de connexion :

Les enroulements d'un transformateur triphasé (primaires et secondaires) peuvent être couplés en étoile ou en triangle, comme les récepteurs en système triphasé. Le couplage s'effectue en fonction de l'utilisation du transformateur. Il faut éviter d'avoir le même couplage au primaire et au secondaire d'un transformateur. Ceci évite de transmettre intégralement le déséquilibre éventuel des courants d'un côté du transformateur à l'autre.

Une troisième configuration peut être attribuée au secondaire, il s'agit du couplage en zig-zag : Chaque enroulement est constitué de deux bobines identiques. On associe une bobine en série avec une autre située sur un autre noyau du CM. Le sens du bobinage du fil des bobines mises en série doit être différents. Ce type de couplage permet de mieux répartir le déséquilibre, si déséquilibre il y a, entre les trois phases du primaire.

ii. Représentation symbolique des couplages :

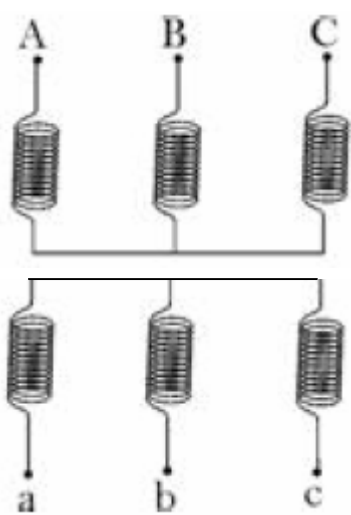
Avec ces différents couplages, étoile et triangle au primaire et étoile, triangle et zig-zag au secondaire on obtient les combinaisons suivantes :

On note : Y pour étoile, D (ou Δ) pour triangle et Z pour zig-zag.

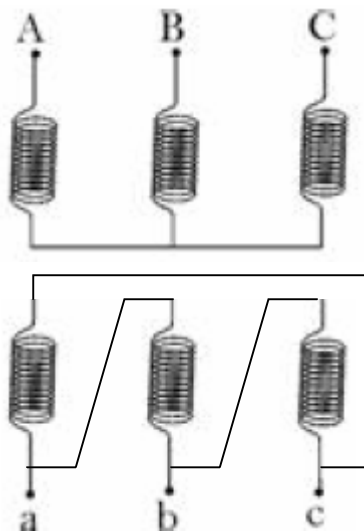
Soit un ensemble de neuf combinaisons possibles : YY, YD, YZ, DD, DY, DZ, ZZ, ZY et ZD.

Une représentation plus significative consiste à utiliser une lettre majuscule pour la haute tension et une lettre minuscule pour la basse tension.

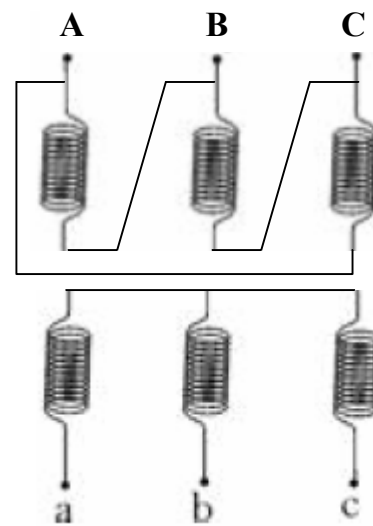
Exemple: Yy, Yd (HT/BT)



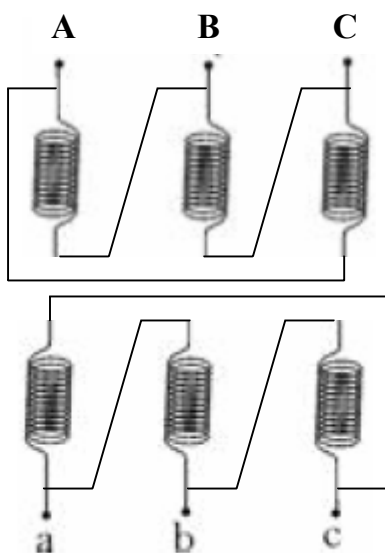
YY



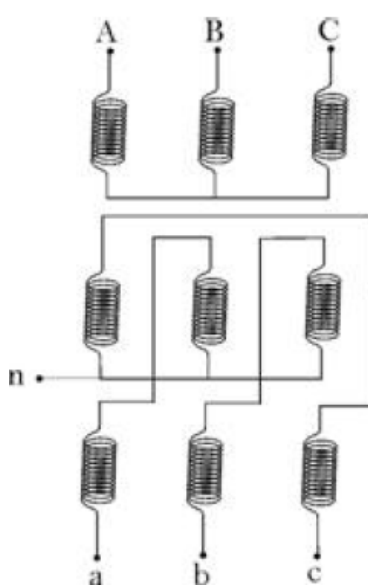
YD



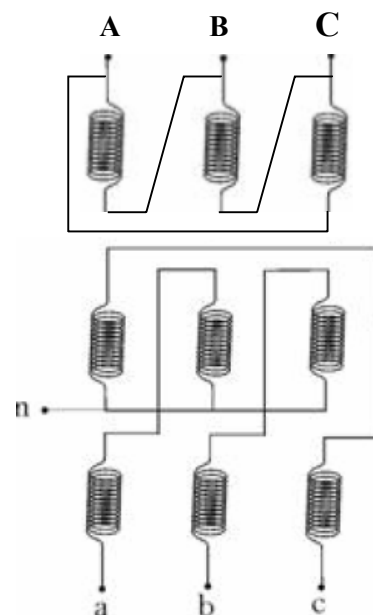
DY



DD



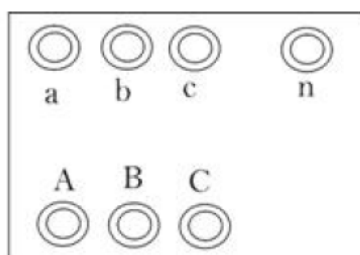
DZ



YZ

iii. Repérage des bornes :

Elles sont repérées par les lettres A,B et C (aussi X, Y, Z ou U, V, W) côté haute tension et a, b et c (x, y, z ou u, v, w) pour les phases correspondantes de la basse tension. S'il y a un neutre (cas de Y ou Z), on ajoute la lettre N ou n à la borne correspondante.



Plaque à bornes d'un transformateur triphasé

2. Grandeurs caractéristiques d'un T 3~

i. Fonctionnement nominal :

Sur la plaque signalétique d'un transformateur triphasé, on indique :

- la puissance apparente utile S_{2n} ;
- les tensions primaire et secondaire composées, entre fils de ligne. Si le mode de connexion n'est pas fixé, on indiquera les valeurs nominales des tensions correspondantes à chaque couple possible.

Exemple : Si une plaque porte les indications suivantes :

○ primaire :

- étoile : $U_{1na} = 380V$
- triangle : $U_{1nA} = 220V$

○ secondaire :

- étoile : $U_{2na} = 220V$
- triangle : $U_{2nA} = 127V$

Cela signifie que les enroulements sont prévus pour travailler sous les tensions normales suivantes :

- primaire : $V_{1n} = \frac{U_{1na}}{\sqrt{3}} = U_{1nA} = 220V$
- secondaire : $V_{2n} = \frac{U_{2na}}{\sqrt{3}} = U_{2nA} = 127V$

Les intensités des courants secondaires en ligne :

$$I_{2na} = \frac{S_{2n}}{\sqrt{3}U_{2na}}$$

$$I_{2nA} = \frac{S_{2n}}{\sqrt{3}U_{2nA}}$$

ii. Rapport de transformation

C'est le rapport des tensions secondaire et primaire de même définition mesurées à vide:

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

k dépend du nombre de spires du primaire et du secondaire et de la nature du couplage. Si $m = \frac{n_2}{n_1}$, alors :

- Couplage **Y/d** : $k = \frac{U_2}{U_1} = \frac{U_{ab}}{U_{1AB}} = \frac{V_2}{\sqrt{3}V_1} = \frac{m}{\sqrt{3}}$

- Couplage **D/y** : $k = \frac{U_2}{U_1} = \frac{U_{ab}}{U_{AB}} = \frac{\sqrt{3}V_2}{V_1} = \sqrt{3}m$

iii. Indice horaire :

Si le primaire du transformateur est soumis à un système triphasé équilibré, le secondaire délivrera un système triphasé équilibré. Toutefois, un déphasage θ est introduit entre les tensions homologues primaires et secondaires, entre V_A et V_a , V_B et V_b , V_C et V_c de même entre V_{AB} et V_{ab} , V_{BC} et V_{bc} , V_{CA} et V_{ca} . Ce déphasage θ est une caractéristique du transformateur triphasé.

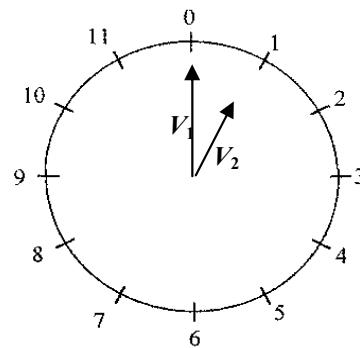
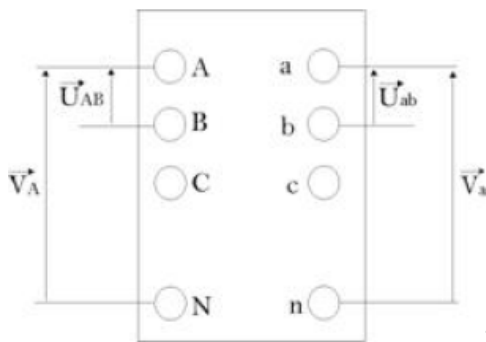


Figure 4-43

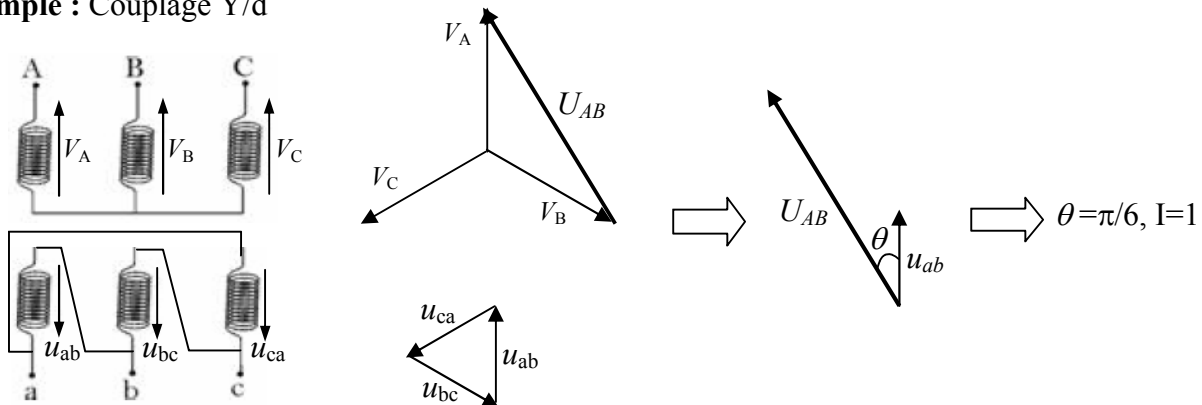
En pratique, les valeurs de θ obtenues sont toujours des multiples de $\pi/6$. On indiquera donc le rapport de θ à $\pi/6$: $I = \frac{\theta}{\pi/6} = \frac{\theta}{30}$

Ce nombre est appelé indice horaire du transformateur, il est compris entre 0 et 11.

Un déphasage de $\theta = 90^\circ$ correspondrait à un indice horaire $I = 3$.

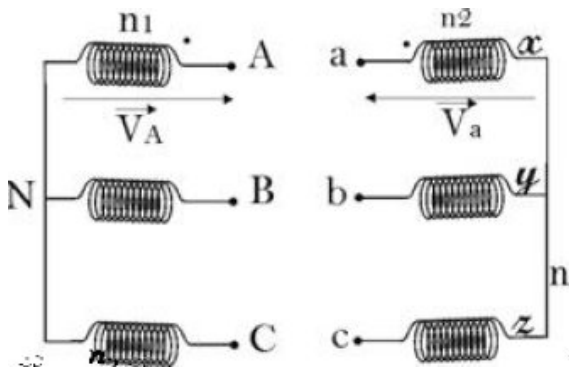
Remarque : Pour la mise en parallèle des transformateurs triphasés, il n'est possible de raccorder que des bornes de même indice horaire.

Exemple : Couplage Y/d

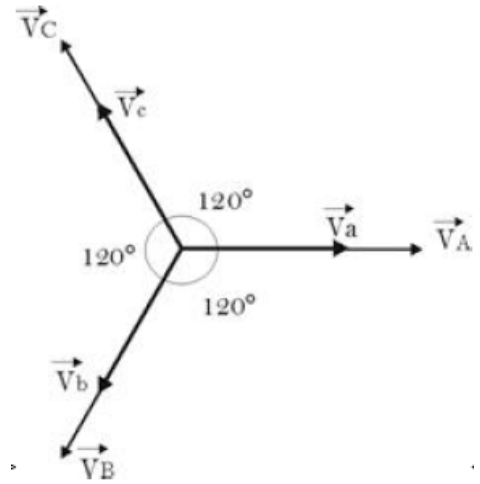


Couplage étoile-étoile (Yy)

Equation aux tensions :



$$V_a = \frac{n_2}{n_1} V_A$$

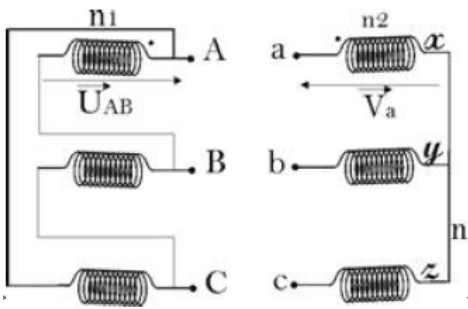


Rapport de transformation : $m = \frac{n_2}{n_1}$

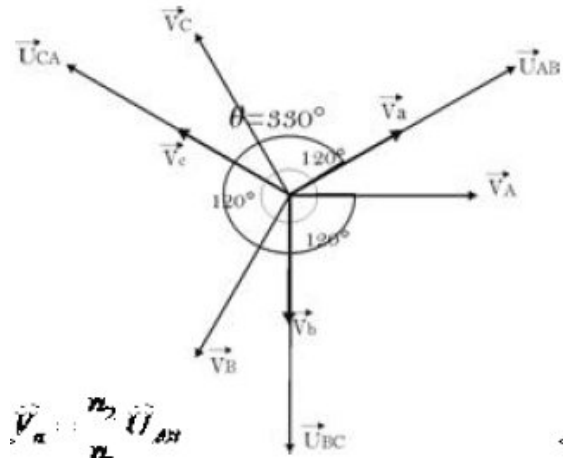
V_a et V_A sont en phase ($\theta = 0$ et $I = 0$).

On désigne ce couplage par **Yy0** (Haute Tension, Basse Tension, Indice horaire).

Couplage triangle-étoile (Dy)



$$V_a = \frac{n_2}{n_1} U_{AB}$$



Dans ce cas, $\theta = 330^\circ$ et $I = 11$.

Rapport de transformation : $k = \frac{U_{ab}}{U_{AB}} = \frac{\sqrt{3}V_a}{U_{AB}} = \sqrt{3} \frac{n_2}{n_1} = \sqrt{3}m$

Ce couplage sera désigné par **Dy11**.

Couplage étoile-zig-zag (Yz)

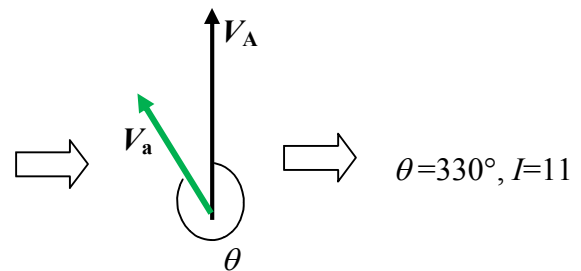
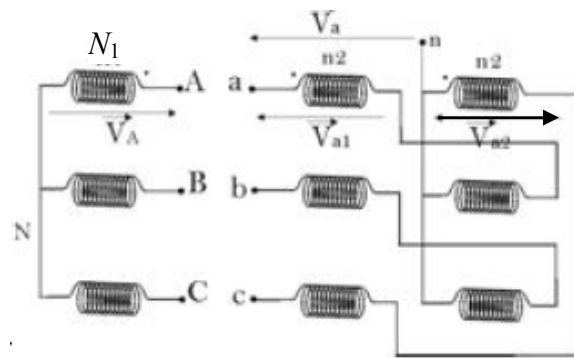
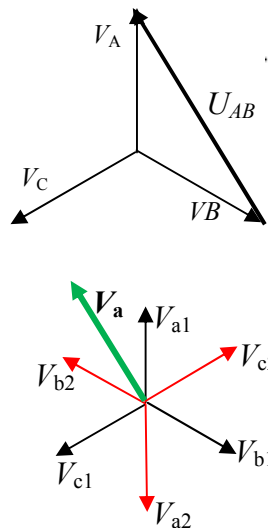
Dans ce cas, le secondaire comporte deux enroulements identiques.

On pose $n_2 = \frac{N_2}{2}$

Equation aux tensions :

$$\vec{V}_{a1} = -\vec{V}_{a2} \text{ et } \vec{V}_{b1} = -\vec{V}_{b2}$$

$$\Rightarrow \vec{V}_a = \vec{V}_{a1} + \vec{V}_{b2}$$



Rapport de transformation :

Puisque $\vec{V}_a = \vec{V}_{a1} + \vec{V}_{b2}$ et $V_{a1} = V_{a2} = V_{b1} = V_{b2}$

$$\Rightarrow V_a = \sqrt{3} \cdot V_{a1} = \sqrt{3} \cdot \frac{V_2}{2} \quad \Rightarrow \quad k = \frac{V_a}{V_A} = \frac{\sqrt{3}V_2}{2V_A} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{N_2}{N_1} = \frac{\sqrt{3}}{2} m$$

Désignation : **YzII**.

Utilisation du transformateur triphasé

1. Essai à vide

Le couplage est alimenté sous tension nominale, on mesure donc : U_{1n} , U_{20} , et I_{10}

Ces valeurs permettent de donner les pertes dans le fer P_{10} et le rapport de transformation m .

Ces mesures peuvent être faites pour une colonne et généralisées au transformateur triphasé, dans le cas d'un système équilibré. Ou bien on utilise un wattmètre triphasé.

$$m = \frac{U_{v2}}{U_{1n}} \quad \text{et} \quad \cos(\varphi_{10}) = \frac{P_{10}}{\sqrt{3}U_{1n} \cdot I_{10}}$$

Détermination des pertes dans le fer :

$$P_{fer} = P_{10} - P_{J10} = P_{10} - 3r_1 I_{10}^2 \quad \text{cas d'un couplage étoile ;}$$

$$P_{fer} = P_{10} - P_{J10} = P_{10} - 3r_1 J_{10}^2 \quad \text{cas d'un couplage triangle ;}$$

Remarque : De façon générale, on néglige les pertes par effet Joule à vide devant la puissance à vide P_{10} .

2. Essai en court-circuit

On doit réaliser un court-circuit symétrique avec trois ampèremètres montés en étoile, ou bien avoir un court-circuit franc et calculer le courant I_{2cc} en mesurant I_{1cc} .

La puissance en court-circuit représente, aux pertes fer près, les pertes par effet Joule, $P_{1cc}=P_J$

On en déduit :

- impédance : $\Rightarrow Z_s = \frac{m.V_{1cc}}{I_{2cc}} = \frac{m.U_{1cc}}{\sqrt{3}I_{2cc}}$
- résistance : $R_s = \frac{P_{1cc}}{3I_{2cc}^2}$
- réactance : $X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2}$
- facteur de puissance en CC : $\cos(\varphi_{cc}) = \frac{R_s}{Z_s} = \frac{P_{1cc}}{\sqrt{3}U_{1cc}I_{1cc}} = \frac{P_{1cc}}{\sqrt{3}mU_{1cc}I_{2cc}}$

3. Rendement du transformateur

Le rendement d'un transformateur est donné par le rapport des puissances utile et absorbée (secondaire et primaire) :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\sqrt{3}U_2 I_2 \cos(\varphi)}{\sqrt{3}U_2 I_2 \cos(\varphi) + P_{fer} + P_J}$$

Fonctionnement en parallèle de deux transformateurs

On peut être amené à faire fonctionner en parallèle deux transformateurs de façon à accroître la puissance utilisable au secondaire. Le fonctionnement optimal de deux transformateurs en parallèle ne requiert pas qu'ils aient les mêmes puissances nominales, mais qu'ils aient:

- le même rapport de transformation,
- la même impédance de court-circuit en valeur réduite ($\Delta U_1 = \Delta U_2$).

Pour le fonctionnement en parallèle des transformateurs triphasés, on impose qu'ils aient le même indice horaire (et pas nécessairement le même couplage).