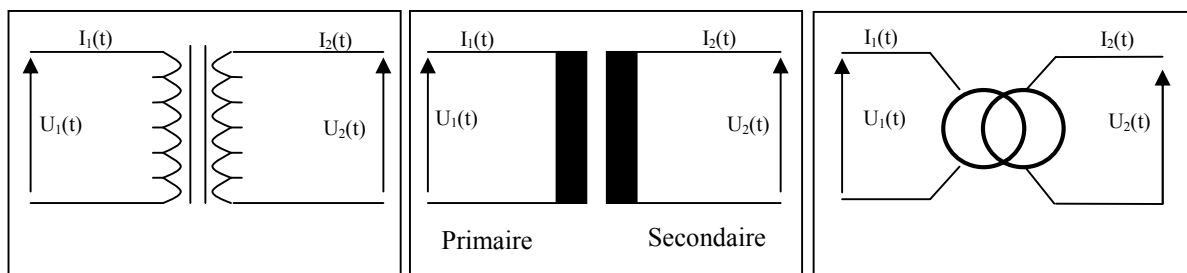


## III.2. Transformateur

Le transformateur est un convertisseur statique qui convertit un signal alternatif en un autre signal alternatif de même fréquence, mais de valeur efficace différente. **Basé sur la loi de Lenz, il ne fonctionne qu'en alternatif.** Avec un excellent rendement (99% pour un transfo industriel), il permet de monter (ou abaisser) la tension tout en abaissant (ou montant) l'intensité. Son utilisation est fondamentale pour le transport de l'énergie électrique à longue distance : les lignes hautes tension (donc faible intensité  $I$ ) sont le siège de pertes Joule  $RI^2$  réduites.

Un transformateur de puissance réalise l'interface entre deux réseaux, entre un réseau et une installation ou entre un réseau et une machine. Il transmet une puissance électrique sous une tension de service spécifiée. Il est à l'origine du régime de neutre du réseau. Par ses propriétés, il est un composant essentiel de la qualité de service apporté aux usagers et aux processus industriels. Par sa présence il contribue à la maîtrise des courants de court-circuit.

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



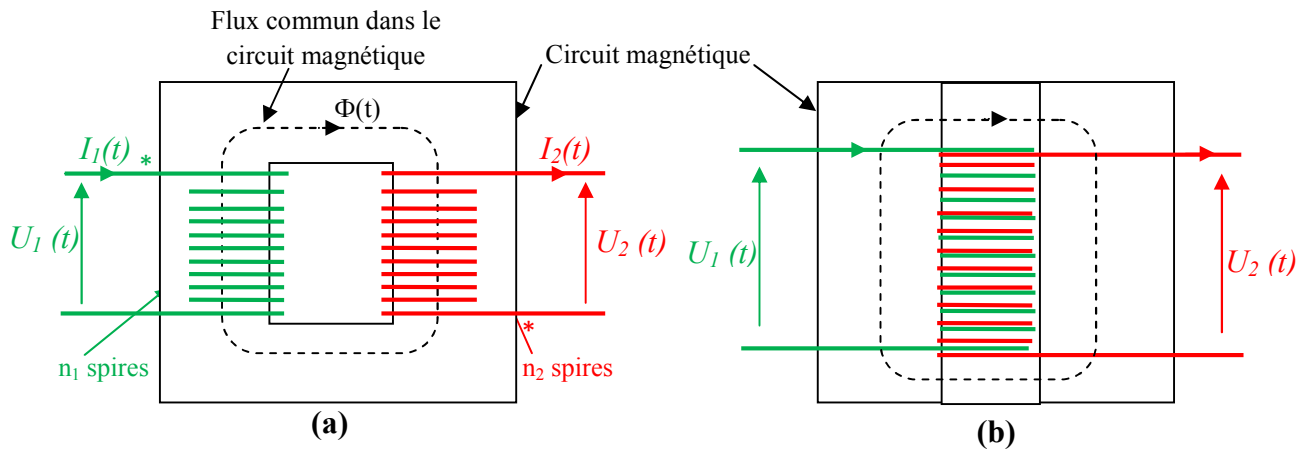
**Figure III.13.** Symboles de transformateur monophasé.

- Le bobinage du primaire est celui qui est alimenté,
- Le bobinage du secondaire est celui qui alimente la charge.

### III.2.1. Constitution des transformateurs monophasés

Un transformateur est constitué d'un circuit magnétique, composé de tôles empilées les unes sur les autres. Sur une colonne de ce circuit magnétique est placé un enroulement réalisé par des spires de fils conducteur. Ce bobinage est appelé enroulement primaire du transformateur. Un second enroulement est bobiné sur le circuit magnétique. Il est appelé enroulement secondaire du transformateur. La tension secondaire à vide est proportionnelle à la tension primaire.

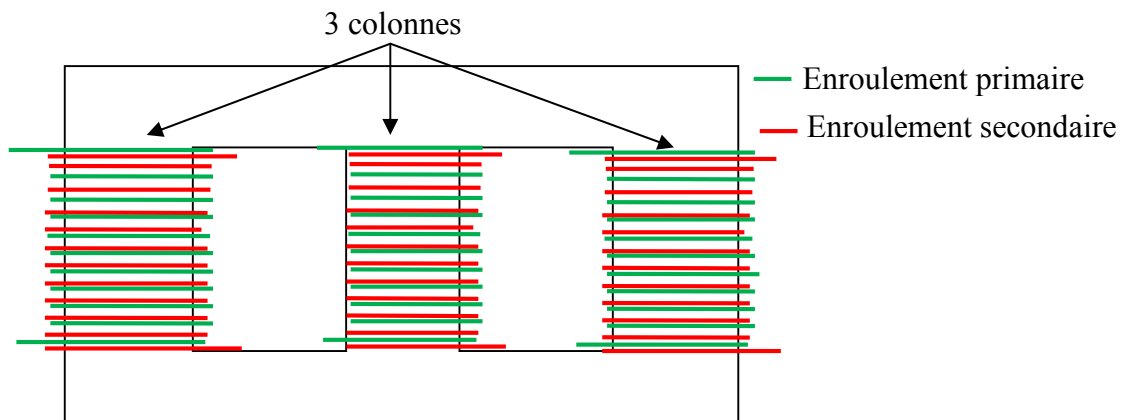
Les étoiles (\*) représentent les bornes homologues du transformateur qui permettent de tenir compte du sens de bobinage des enroulements.



**Figure III.14.** Constitution d'un transformateur monophasé.

Dans la réalité les bobinages primaire et secondaire sont souvent imbriqués afin d'améliorer le couplage. (figure III.14(b)).

En triphasé, le circuit magnétique comporte généralement 3 colonnes. Sur chaque colonne, un enroulement primaire est imbriqué avec un enroulement secondaire. Les trois enroulements secondaires sont reliés ensemble par des barres de couplage. On fait de même pour les enroulements primaires. (figure III.15).



**Figure III.15.** Constitution d'un transformateur triphasé dans le cas réel

### III.2.2. Rapport de transformation

Lorsque le transformateur est soumis à une tension sinusoïdale (figure III.14), l'enroulement primaire est parcouru par un courant  $I_1(t)$ . Ce courant crée par induction un flux  $\Phi(t)$  variable dans le circuit magnétique. Il apparaît donc aux bornes de l'enroulement

secondaire, une force électromotrice induite, proportionnelle au nombre de spires de cet enroulement ( $n_2$ ). On appelle rapport de transformation ( $m$ ), le rapport de  $U_{20}$  (tension secondaire à vide) sur  $U_1$ .  $m = \frac{n_2}{n_1} = \frac{U_{20}}{U_1}$  (III.43)

Lorsque l'enroulement secondaire est couplé en charge, (figure III.14), un courant  $I_2(t)$  circule. Ce courant va générer un courant primaire dont la valeur nous est donnée par l'application du théorème d'ampère. On retrouve le rapport de transformation ( $m$ ) entre les courants primaire et secondaire en considérant que la somme des ampères/tour est égale à zéro. Dans un transformateur supposé parfait, il ya transfert total de la puissance.

$$n_1 I_1 - n_2 I_2 = R\phi = n_1 I_{10} \cong 0 \Rightarrow m = \frac{n_2}{n_1} = \frac{I_1}{I_2} \quad (\text{III.44})$$

$$S = U_{1n} I_{1n} = \frac{U_{20}}{m} I_{1n} = U_{20} I_{2n} \quad (\text{III.45})$$

### III.2.3. Utilisation

L'énergie électrique doit être acheminée du centre de production jusqu'au consommateur. Le transport s'effectue sous haute tension pour diminuer l'intensité du courant et donc la section des câbles. Des transformateurs assurent l'élévation de la tension en sortie des centres de production. D'autres transformateurs assurent l'adaptation de la tension aux besoins des utilisateurs.

### III.2.4. Puissances installées

Suites à son évolution au cours de temps, on retrouve différentes tensions, par exemple sur le réseau français :

- Le grand transport s'effectue sous 400 kV ou 225 kV,
- La répartition et la distribution s'effectue sous 90, 63, 20 ou 6.5 kV pour finalement arriver au 230/400V qui alimente le consommateur.

Des transformateurs permettent l'adaptation des tensions à chaque niveau.

Une des caractéristiques importante du transformateur est sa puissance apparente ( $S$ ).

\*Le transformateur a été l'élément déterminant dans le développement des réseaux de transport du courant alternatif.

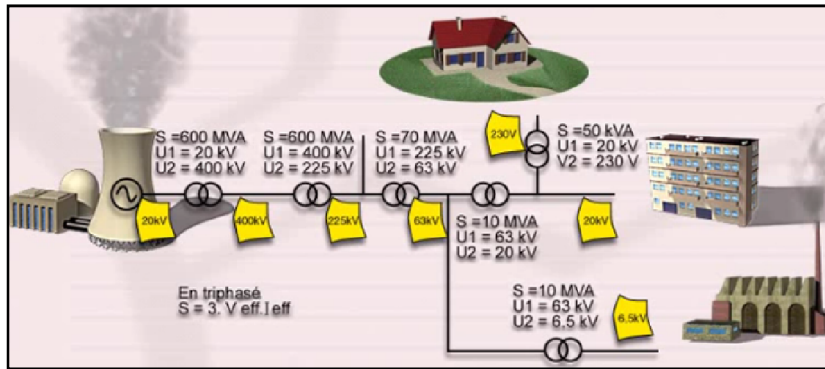


Figure III.16. Structure unifilaire du réseau de distribution.

### III.2.5. En charge

A partir des éléments du schéma équivalent, (Ils seront calculés plus tard) nous pouvons déterminer :

La tension délivrée par le secondaire du transformateur pour un débit et un facteur de puissance donné, la valeur du courant de court-circuit si celui-ci se produit à la sortie du transformateur, les différentes pertes et chiffrer les coûts d'exploitation. Le constructeur nous donne les indications nécessaires aux calculs des différents éléments.

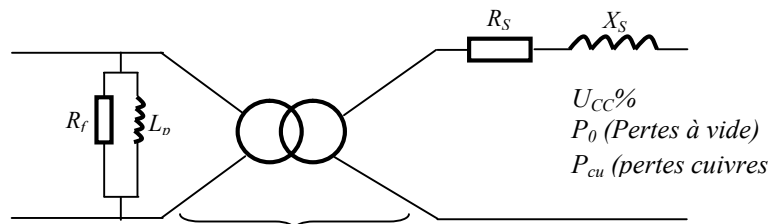


Figure III.17. Schéma équivalent d'un transformateur.

#### 1) Chute de tension

A vide la tension secondaire ne dépend que de la tension d'alimentation et du rapport de transformation ( $m$ ). En charge, il apparaît une chute de tension que l'on peut représenter vectoriellement. Cette chute de tension, beaucoup plus faible que les tensions nominales, permet de considérer que les tensions à vide ( $U_{20}$ ) et en charge ( $U_2$ ) sont en phase. La valeur de la chute de tension dépend du débit et du facteur de puissance de la charge.

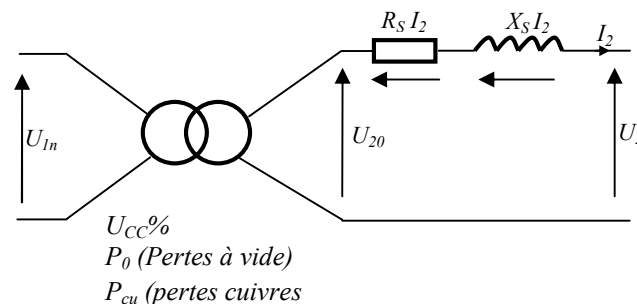


Figure III.18. Schéma équivalent ramené au secondaire

$$U_{20} = m U_{1n}$$

$$\Delta U = R_s I_2 \cos \varphi \pm X_s I_2 \sin|\varphi| \tag{III.46}$$

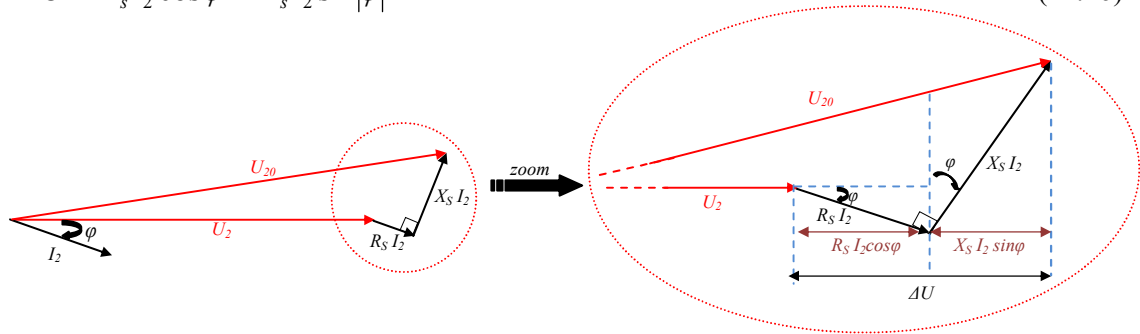


Figure III.19. Diagramme vectorielle.

## 2) Valeurs réduites

La tension de court-circuit est la fraction (en%) de la tension nominale qu'il faut appliquer à un enroulement pour faire circuler le courant nominal dans l'autre enroulement mis en court-circuit. En connaissant les pertes joules du transformateur nous pouvons déterminer les composantes résistives et inductives de la tension de court-circuit et tracer le diagramme de Fresnel. Ce sont les valeurs réduites du transformateur. Elles permettent de prédéterminer le fonctionnement en charge.

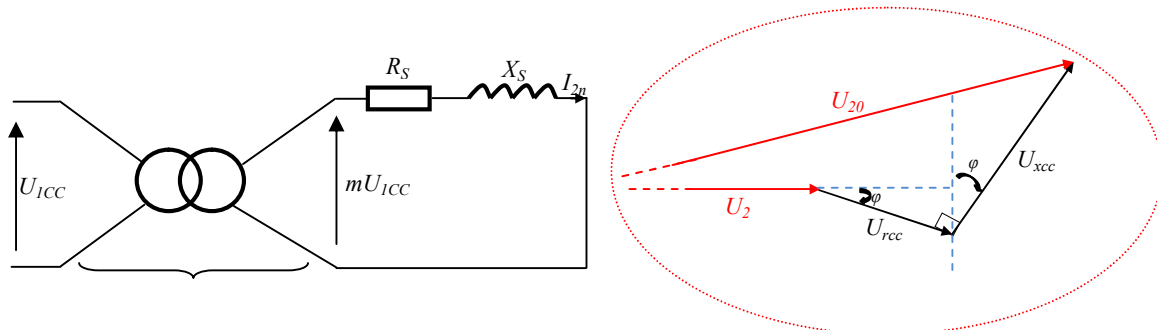


Figure III.20. Schéma équivalent en court-circuit et leur diagramme vectorielle.

$$U_{cc} \% = \frac{U_{1cc}}{U_{1n}} 100 \tag{III.47}$$

$$U_{rcs} \% = \frac{P_{cu}}{S_n} 100 \tag{III.48}$$

$$U_{xsc} \% = \sqrt{(U_{cc})^2 - (U_{rcs} \%)^2} \tag{III.49}$$

$$\Delta U \% = \frac{I_2}{I_{2n}} (U_{rcs} \% \cos \varphi \pm U_{xsc} \% \sin|\varphi|) \tag{III.50}$$

### Remarque

Une forte tension de court-circuit induit une chute de tension élevée. Une faible tension de court-circuit peut, en cas d'incident, entraîner un courant de court-circuit élevé donc des efforts électrodynamiques importants et nécessiter l'emploi de dispositifs de protection performants. Le savoir faire du constructeur permet de trouver un bon compromis.

### 3) Rendement

Dans le transformateur, il faut distinguer :

Les pertes à vide, ou pertes fer, qui sont pratiquement indépendantes de la charge, les pertes dues à la charge, ou pertes joules, qui sont proportionnelles au carré de l'intensité du courant.

Le rendement s'exprime en fonction de ces pertes. Il est maximal lorsqu'elles sont égales.

( $\eta \text{ max si } P_f = P_j$ ). Le transformateur reste toutefois un appareil qui a un excellent rendement sur une large plage d'utilisation.

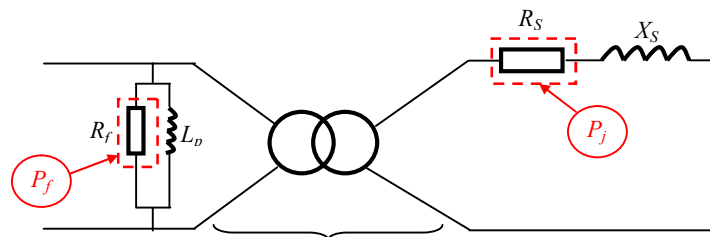


Figure III.21. Schéma équivalent d'un transformateur monophasé.

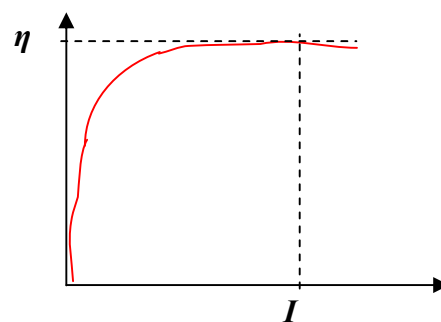


Figure III.22. Rendement vs courant de charge.

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + P_f + P_j} \quad (\text{III.51})$$

$$\eta \text{ max si } P_f = P_j$$

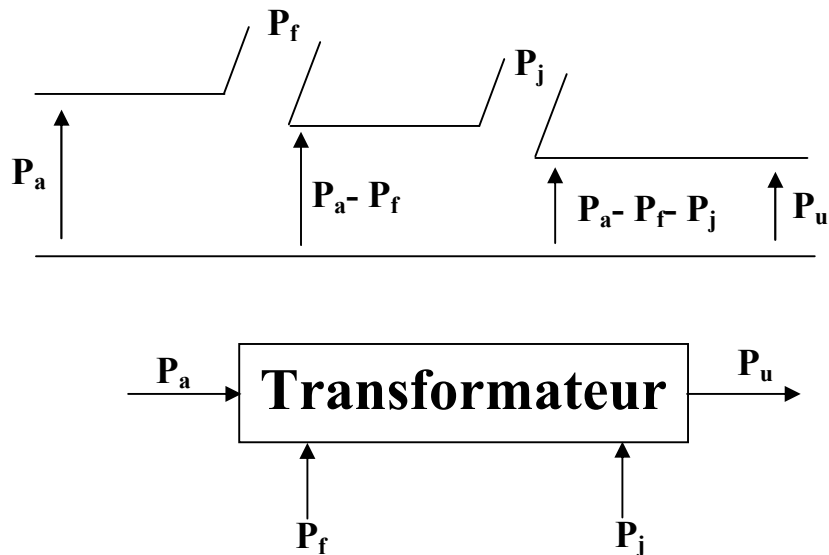


Figure III.23. Arbre des puissances.

### III.2.6. Schéma équivalent ( $3\sim \gggg 1\sim$ )

Un transformateur triphasé en régime équilibré s'étudie à partir d'un schéma monophasé. Quel que soit le couplage, on considère celui-ci comme étoile-étoile. Les éléments du schéma équivalent sont calculés à partir de la valeur de la tension entre phase divisée par  $\sqrt{3}$ . La puissance apparente et les pertes joules sont divisées par  $\sqrt{3}$ . Les résultats obtenus s'appliquent aux tensions simples. On utilise les **valeurs réduites** pour déterminer le modèle équivalent monophasé.

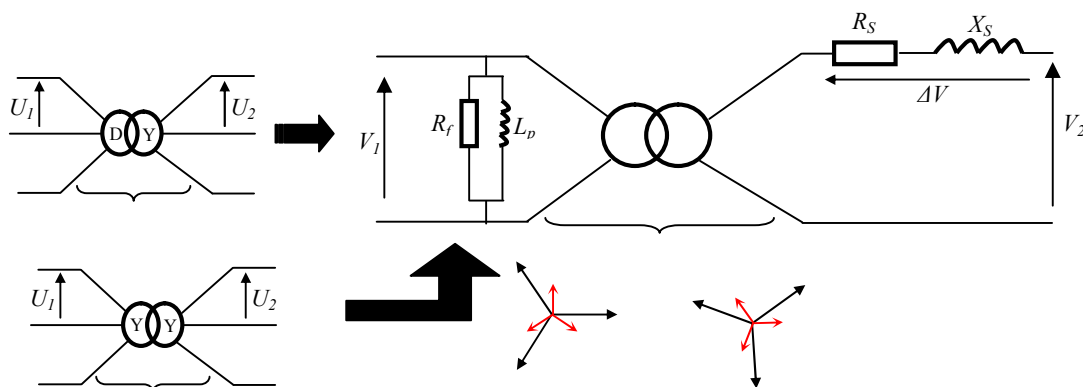


Figure III.24. Schéma équivalent d'un transformateur.

$$R_s = \frac{P_{cu}}{3I_{2n}^2} = \frac{P_j U_{20}^2}{S_n^2} \quad (III.52)$$

$$m = \frac{U_{20}}{U_{1n}}, \Delta U = R_s I_2 \cos \varphi \pm X_s I_2 \sin |\varphi|$$

$$\Delta U = \frac{I_2}{I_{2n}} (U_{rcc} \% \cos \varphi \pm U_{xcc} \% \sin |\varphi|) \quad (\text{III.53})$$

### III.2.7. Les essais

Les essais effectués sur les sur les transformateurs ont pour but d'assurer la conformité des caractéristiques électriques et thermiques avec les spécifications de la commande. Ils permettent également de vérifier la conformité du produit avec les normes. On distingue les essais réalisés sur chaque transformateur:

#### 1) Essais systématiques

- Essais diélectriques,
  - Tension induite,
  - Tension appliquée,
  - De charge partielle,
- Essais à vide,
- Essais en court-circuit,
- Vérification du couplage,
- Résistance des enroulements.

#### a) Essais à vide

Le primaire du transformateur est alimenté sous sa tension nominale, le secondaire n'est pas relié. Le courant primaire étant faible, on peut considérer les pertes joules négligeables. La puissance absorbée correspondant aux **pertes fer**. Cet essai permet de déterminer le **rapport de transformation (m)**. Il permet également de calculer les impédances **R<sub>f</sub>** et **X<sub>p</sub>** du schéma monophasé équivalent.

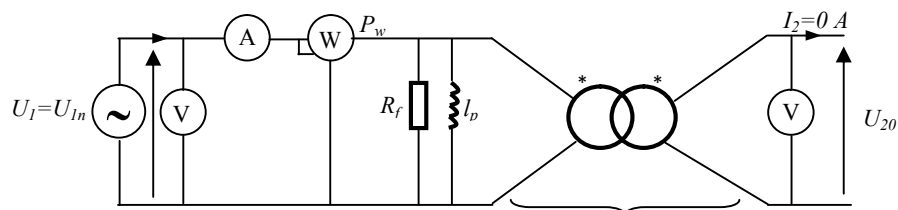


Figure III.25. Schéma équivalent d'un essai a vide.

$$P_w = P_f = P_{10} = U_{1n} I_{10} \cos \varphi_{10} \quad (\text{III.54})$$



$$m = \frac{U_{20}}{U_{1n}},$$

$$R_f = \frac{U_{1n}^2}{P_f} = \frac{U_{1n}}{I_{10} \cos \varphi_{10}} \quad (\text{III.55})$$

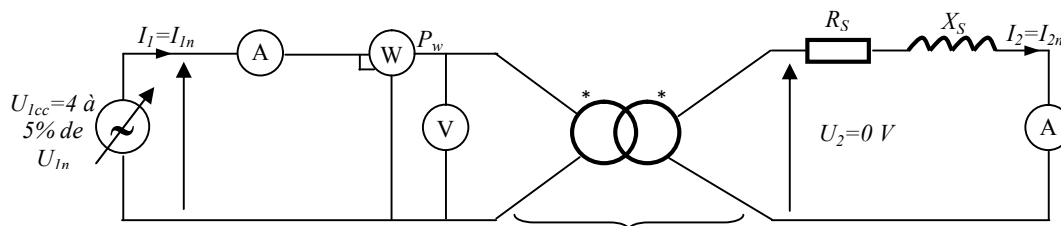
$$X_p = l_p \omega = \frac{U_{1n}^2}{\sqrt{(U_{10} - I_{10})^2 - P_f^2}} \quad (\text{III.56})$$

**Remarque**

a vide :  $P_w = P_{10} = P_f$ ;  $R_f = U_{1n} / P_f$ ;  $X_p = l_p \omega$ ;  $U_{1n} = U_1 = U_{10}$ ,  $U_{20} = m U_{1n}$ ;  $I_2 = I_{20} = 0A$ .

**b) Essais en court-circuit**

Le primaire de transformateur est alimenté sous une tension réduite. Le secondaire est en court-circuit et les courants sont proches des valeurs nominales. La tension d'alimentation étant faible, les pertes fer seront négligées. La puissance absorbée correspond aux pertes joules. Cet essai permet de déterminer la tension de court-circuit du transformateur ( $U_{cc} \%$  ainsi que ses composantes résistives et induites) et les impédances  $R_s$  et  $X_s$  du schéma monophasé équivalent.



**Figure III.26.** Schéma équivalent d'un essai en court-circuit.

$P_j$  est souvent appelé  $P_{cu}$

$$P_w = P_j \quad (\text{III.57})$$

$$R_s = \frac{P_j}{I_{2n}^2} = \frac{P_j U_{20}^2}{S_n^2} \quad (\text{III.58})$$

$$Z_s = \frac{m U_{1cc}}{I_{2n}} = \frac{U_{cc} \%}{100} \frac{U_{20}^2}{S_n} \quad (\text{III.59})$$

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} \quad (\text{III.60})$$

**Remarque**

court-circuit:  $P_w = P_{cu} = P_j$ ;  $I_{2n} = I_2$ ;  $U_{cc} = 5\% U_{1n}$ ;  $Z_s = R_s + j X_s$ ;  $U_{20} = 0V$ .

### c) Essais en charge

Pour des transformateurs de faible puissance, on peut procéder à un essai en charge qui permet de mesurer le rendement et la tension de sortie. Mais, la moindre incertitude sur les mesures de puissance et de tension conduit à de grosses erreurs sur le rendement et la chute de tension, due au transformateur. Il est préférable d'utiliser les résultats obtenus lors des deux essais précédents pour déterminer le fonctionnement en charge.

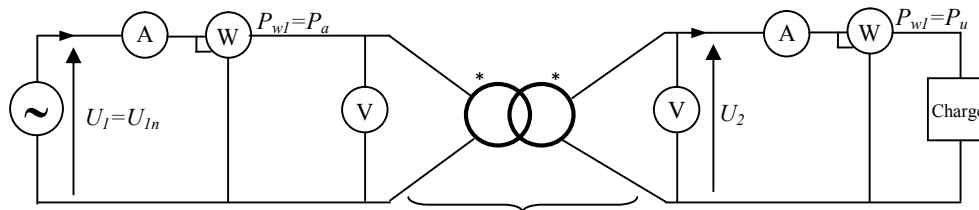


Figure III.27. Schéma équivalent d'un essai en charge.

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}, \text{ avec } P_u \text{ peu différent de } P_a \qquad \eta = \frac{P_u}{P_u + P_f + P_j} \quad (\text{III.61})$$

$$\Delta U = U_2 - U_{20} \quad (\text{III.62})$$

$U_2$  peu différent de  $U_{20}$

$$\Delta U \% = \frac{I_2}{I_{2n}} (U_{rcc} \% \cos \varphi \pm U_{xcc} \% \sin |\varphi|) \quad (\text{III.63})$$

### 2) Essais supplémentaires

- Choc de foudre, échauffement,
- Tenue au court-circuit, niveau de bruit.

### III.2.8. Rôle des transformateurs dans le transport et la distribution de l'énergie électrique

- Production: 20 kV (50 Hz)
- Transport : 20 kV/400 kV (transfo. élévateur)  
400 kV/225 kV/90 kV/63 kV (transfos. abaisseurs)
- Distribution : 63 kV/20 kV/400 V

### III.2.9. Caractéristiques pratiques du transformateur

- Essai à vide et essai en court circuit
- Sn Puissance apparente nominale (VA)
- $V_{pn}$ ,  $V_{sn}$  tensions primaire et secondaire (V)
- $U_{pn}$ ,  $U_{sn}$  tensions primaire et secondaire (V)

- $I_{pn}$ ,  $I_{sn}$  courants primaire et secondaire (I)
- Rendement, Température, Couplage, indice horaire
- Rapport de transformation fixe, variable, plots de variation de V au primaire

**TRANSFORMATEUR TRIPHASE 50 Hz** réf. de conformité

Conforme à **NFC 52113** année **1994**

kVA **1600 /** N° niveau d'isolement **125 / 50** kV

tension de c/c **6** % symb. couplage **Dyn11** ou **Dyn 11**

primaire en service sur

|          |       | PRIMAIRE |         | SECONDAIRE |        |
|----------|-------|----------|---------|------------|--------|
| tensions | pos 1 | 20500    | 15499,7 | V          |        |
|          | pos 2 | 20000    | 15000   | V          |        |
|          | pos 3 | 19500    | 14500,3 | V          |        |
|          | pos 4 |          |         | V          | 410    |
|          | pos 5 |          |         | V          |        |
| courants |       | 46,2     | 61,6    | A          | 2253,1 |

nature enroul' **aluminium**

agent et mode de refroidissement

diélectrique **huile**

masse diél. **840** kg

masse totale **3460** kg

**Figure III.28.** Plaque signalétique d'un transformateur de puissance triphasés.