

TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ

sommaire

1 Généralités.....	2
1.1 Notations utilisées.....	2
1.2 Plaque signalétique.....	2
1.3 Réalisation d'un transformateur triphasé.....	2
1.2.1 Constitution.....	2
1.2.2 Principe de fonctionnement.....	2
2 Caractéristiques.....	3
2.1 Couplages.....	3
2.2 Rapports de transformation.....	3
2.3 Indice horaire.....	4
2.3.1 Méthode théorique de calcul de l'indice horaire :.....	5
2.3.2 Méthode pratique de détermination de l'indice horaire (méthode des électriciens) :...5	5
2.4 Dénomination d'un transformateur triphasé.....	6
3 Modèles équivalents.....	6
3.1 Modèle équivalent par colonne.....	6
3.2 Modèle équivalent par phase.....	7
3.3 Impédance de sortie Z_s et tension de court-circuit	8
4 Mise en parallèle de transformateurs.....	9
5 Transformateurs dans les réseaux électriques.....	11
5.1 Choix du couplage d'un transformateur.....	11
5.2 Couplages possibles.....	12
5.3 Couplages utilisés.....	13
6 Rendement et Facteur de déclassement k.....	14
Rendement.....	14
Facteur de déclassement.....	14

1 GÉNÉRALITÉS.

1.1 NOTATIONS UTILISÉES.

On étudiera les transformateurs comme abaisseurs de tension.

Toutes les grandeurs coté haute tension seront en majuscule : tension $U_{AB} = U_{HT}$.

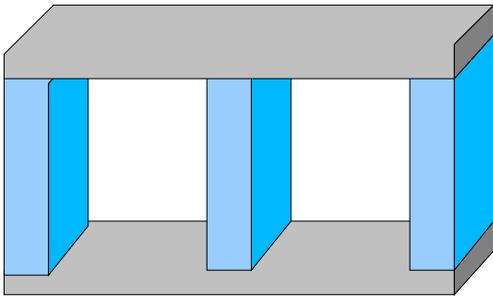
Toutes les grandeurs coté basse tension seront en minuscule : tension $U_{ab} = U_{bt}$.

1.2 PLAQUE SIGNALÉTIQUE

$$S = \sqrt{3} U_{HT} I_{HT} = \sqrt{3} U_{bt} I_{bt}$$

1.3 RÉALISATION D'UN TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ.

1.2.1 CONSTITUTION



On associe 3 transformateurs monophasés sur un même circuit magnétique constitué de 3 ou 4 colonnes reliées entre elles.

Les 3 bobinages primaires sont identiques, tout comme les bobinages secondaires.

Il pourra y avoir 1 ou 2 bobinages secondaires.

Chaque colonne porte un enroulement primaire et l'(les) enroulement(s) secondaire(s).

1.2.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

On applique un système triphasé équilibré de tensions sur les enroulements primaires du transformateur.

Les enroulements primaires créent des champs magnétiques variables. Ces champs magnétiques créent à leur tour des fem (tensions) aux bornes des enroulements secondaires.

Sur les enroulements secondaires, on obtient un système triphasé équilibré de tension.

Pour choisir le rapport entre les tensions primaire et secondaire, on joue sur le rapport du nombre de spires entre les enroulements primaire et secondaire.

Le flux créé dans une colonne se répartit dans les autres colonnes.

On cherche :

- à ne pas saturer les colonnes (magnétiquement),
- à avoir les mêmes intensités de flux dans chaque colonne pour avoir des courants de magnétisation équilibrés.

Il existe plusieurs types de technologie de circuits magnétiques :

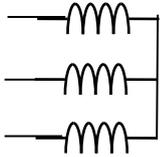
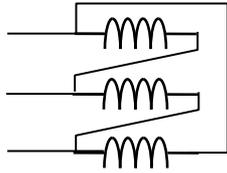
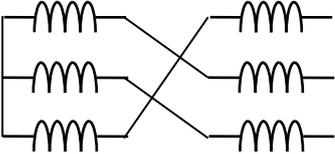
- Transformateur à flux liés (3 colonnes).
- Transformateur à flux libres (4 colonnes).

2 CARACTÉRISTIQUES

2.1 COUPLAGES.

Le couplage au primaire peut être étoile ou triangle.

Le couplage au secondaire peut être étoile, triangle ou zig zag.

<p>Étoile</p>  <p>Aux bornes du bobinage, on trouve la tension simple : $\vec{E}_{bob} = \vec{V}$</p>	<p>Triangle</p>  <p>Aux bornes du bobinage, on trouve la tension composée : $\vec{E}_{bob} = \vec{U}$</p>
<p>Zig zag</p> 	<p>On relie 2 bobinages de même nombre de spire mais montés sur 2 colonnes différentes.</p> <p>La tension simple au secondaire est une combinaison des tensions d'enroulements :</p> <p>ex : $\vec{E}_{bob1} + \vec{E}_{bob2} = \vec{V}_2$</p>

2.2 RAPPORTS DE TRANSFORMATION.

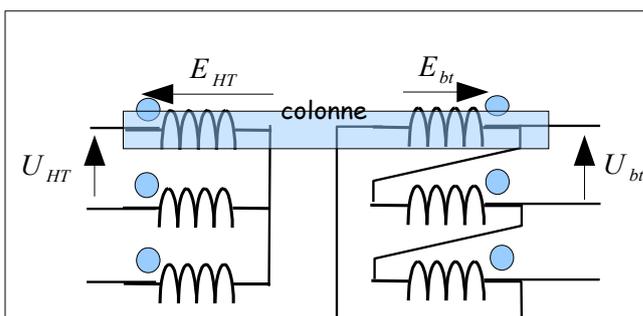


Figure 1: Fléchage des fem

Le **rapport de transformation** (industriel) est le rapport entre les tensions composées secondaire à vide et primaire : $m = U_{bt-0} / U_{HT}$

Le rapport de transformation dépend du couplage du transformateur.

Le **rapport de transformation par colonne** est le rapport du nombre de spires entre le secondaire et le primaire . $m_c = N_2 / N_1$

Le rapport de transformation par colonne est aussi le rapport des fem sur les bobinages HT et bt d'une même colonne : $m_c = E_{bt} / E_{HT}$

Le rapport de transformation industriel et le rapport de transformation par colonne peuvent avoir des valeurs différentes.

2.3 INDICE HORAIRE.

ATTENTION : les systèmes triphasés au primaire et au secondaire peuvent être déphasés. Ce déphasage, nombre entier multiple de 30° , dépend des modes de couplage. Ce nombre entier est appelé « indice horaire » du transformateur.

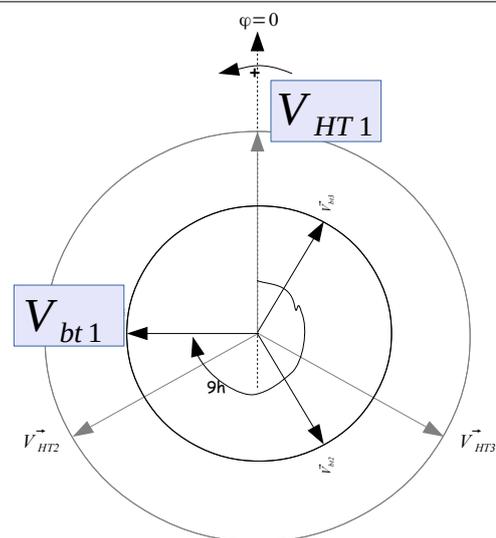
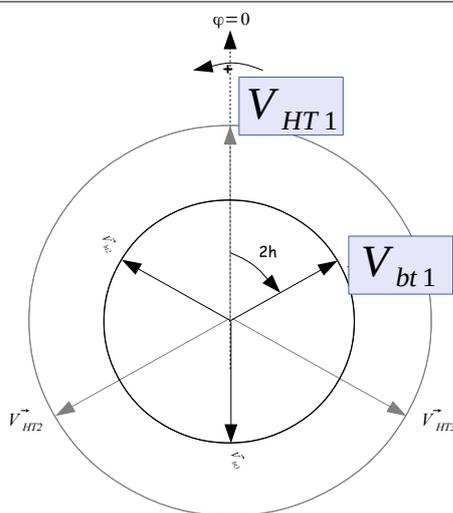
L'indice horaire est défini pour un transformateur abaisseur HT/bt, branché sur une réseau de tensions équilibrées directes.

Il n'y a aucun lien électrique entre le primaire et le secondaire : les tensions primaires et secondaires ne sont pas forcément en phase.

Si on « place » la tension primaire verticalement. La tension de même nom au secondaire est alors placée à « IH » heure de la tension primaire.

Exemple : un indice horaire de 2h veut dire que la tension secondaire est en retard de $2 \times 30^\circ = 60^\circ$ sur la tension de même nom au primaire.

Exemple : un indice horaire de 9h veut dire que la tension secondaire est en retard de $9 \times 30^\circ = 270^\circ$ sur la tension de même nom au primaire.



Calcul théorique : Sur le diagramme de Fresnel, on comparera la tension secondaire avec la tension primaire de même nom (voir page 5).

Détermination pratique : méthode des électriciens : sur le diagramme de Fresnel, le système des 3 tensions secondaires a tourné de $IH \times 30^\circ$ par rapport au système de tensions primaires. Les tensions au secondaire formeront un système équilibré direct (voir page 5).

2.3.1 MÉTHODE THÉORIQUE DE CALCUL DE L'INDICE HORAIRE :

Principe de la Méthode : les systèmes triphasés se déphasent et on lit le déphasage comme présenté dans le paragraphe « Indice horaire. » page 4.

cas des couplage étoile ou triangle

- On flèche les fem bt et HT en pointant les bornes homologues comme sur la Figure 1 : Fléchage des fem Page 3.
- Écrire la relation entre les fem au primaire et au secondaire : $E_{bt} = + m_C E_{HT}$.
- On écrit une fem bt (E_{bt1} par exemple) en fonction des tensions réseau $f(V_{bt} \text{ ou } U_{bt})$.
- On identifie la fem HT correspondant à la fem bt précédente. On écrit cette fem E_{HT1} en fonction des tensions réseau $f(V_{HT} \text{ ou } U_{HT})$.
- On en déduit l'expression de la tension bt en fonction des tensions HT.
 $f(V_{bt}) = E_{bt1} = + m_C E_{HT1} = f(V_{HT})$
- Tracer \vec{V}_{HT} et \vec{V}_{bt} de mêmes noms sur le diagramme de Fresnel.
- Mesurer l'angle entre les deux vecteurs. **En déduire l'IH**

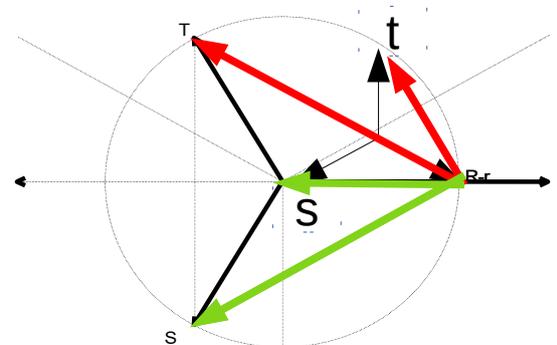
Si le couplage au secondaire est zig zag, on écrira la tension simple du secondaire en fonction des fem bt. Les fem bt seront ensuite écrites en fonction des fem HT. Pour finir, les fem HT seront écrites en fonction des tensions HT. Ensuite Tracer \vec{V}_{HT} et \vec{V}_{bt} de mêmes noms. Mesurer l'angle entre les deux vecteurs. **En déduire l'IH**

2.3.2 MÉTHODE PRATIQUE DE DÉTERMINATION DE L'INDICE HORAIRE (MÉTHODE DES ÉLECTRICIENS) :

Principe de la Méthode : on fixe les potentiels V_R et V_r à la même valeur en les connectant par un fil. Le système triphasé secondaire tourne par rapport au système triphasé primaire autour du point R=r. On lit le déphasage en comparant les tensions primaires et secondaires de même nom.

Le diagramme de Fresnel devra être fait à l'échelle

- Repérer les enroulements et les bornes homologues (mêmes méthodes qu'en monophasé).
- Relier les bornes R (primaire) et r (secondaire) par un conducteur afin que ces deux points soient au même potentiel.
- Mesurer avec un voltmètre les tensions : $U_{sR}, U_{sS}, U_{sT}, U_{tR}, U_{tS}, U_{tT}$.
- Reportez les tensions mesurées sur le diagramme de Fresnel. Tracer les tensions secondaires.
- Le lien entre \vec{U}_{RT} et \vec{U}_{rt} est le même que entre \vec{U}_{RS} et \vec{U}_{rs} . La rotation est de $+IH \cdot 30^\circ$ (**IH = 1** dans l'exemple)



ECHELLE

2.4 DÉNOMINATION D'UN TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ.

On note en lettres majuscules ce qui est relatif à la haute tension, et en minuscules pour la basse tension.

On indique pour le primaire et le secondaire si les neutres sont sortis par la lettre N ou n.

On indique à la fin l'indice horaire.

Exemple : **D z_n1** (D : Triangle au primaire ; z : Zigzag au secondaire ; n : neutre au secondaire disponible ; 1*30° : système tensions secondaires en retard de 30° sur tensions primaires)

Exemple : **Yd 5** (Y : étoile au primaire ; d : Triangle au secondaire ; 5*30° : système tensions secondaires en retard de 150° sur tensions primaires)

3 MODÈLES ÉQUIVALENTS.

Le modèle équivalent est celui du transformateur monophasé, mais les valeurs du modèle vont dépendre du couplage du primaire et de celui du secondaire.

Les trois phases auront le même modèle équivalent.

3.1 MODÈLE ÉQUIVALENT PAR COLONNE.

On modélise le transformateur monophasé bobiné sur une colonne.

Ce modèle donne la relation entre la fem et le courant du bobinage HT ; la relation entre la fem et le courant du bobinage bt. Il fait intervenir le rapport de transformation par colonne m_C .

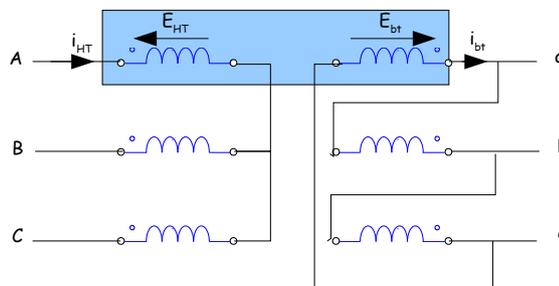


Illustration 1: définition des fem et des courants des bobinages de la colonne 1 d'un transformateur Yd11

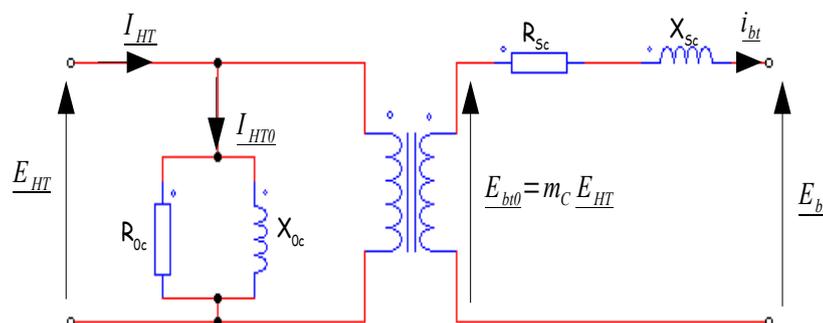


Illustration 2: modèle équivalent par colonne du transformateur Yd11

Pour la détermination des éléments du modèle équivalent par colonne, on exploite les essais à vide et en court circuit :

Essai à vide : $R_{0c} = \frac{E_{HT}^2}{(P_{10}/3)}$ $X_{0c} = L_{0c} \omega = \frac{E_{HT}^2}{(Q_{10}/3)}$	Essai en court circuit : $R_{Sc} = \frac{(P_{1cc}/3)}{I_{bt}^2}$ $X_{Sc} = L_{fsc} \omega = \frac{(Q_{1cc}/3)}{I_{bt}^2}$
---	--

Il faut identifier les fem et courants bobinages par rapport aux fem et courants réseaux HT et bt.

Dans le cas de ce transformateur Yd11:

Coté HT $E_{HT} = V_{AN} \quad I_{HT} = I_A$	Coté bt $E_{bt} = U_{ac} \quad I_{bt} = J_a = I_a / \sqrt{3}$
---	--

3.2 MODÈLE ÉQUIVALENT PAR PHASE.

Ce modèle donne la relation entre la tension simple et le courant ligne coté HT, et la relation entre la tension simple et le courant ligne de la même phase coté bt.

Il fait intervenir le rapport de transformation m et l'indice horaire, c'est à dire le rapport de transformation complexe : $m = m e^{-j(IH) \times 30^\circ}$

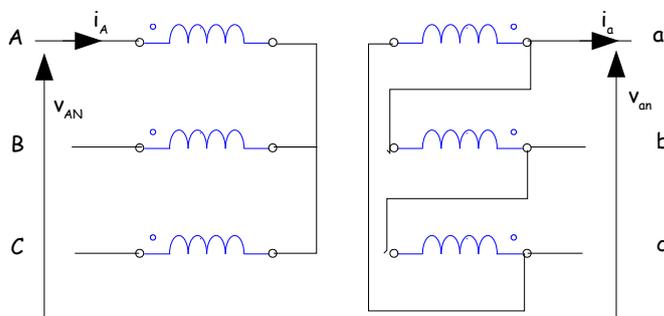


Illustration 3: définition des tension simples et courants ligne phase 1 du transformateur Yd11

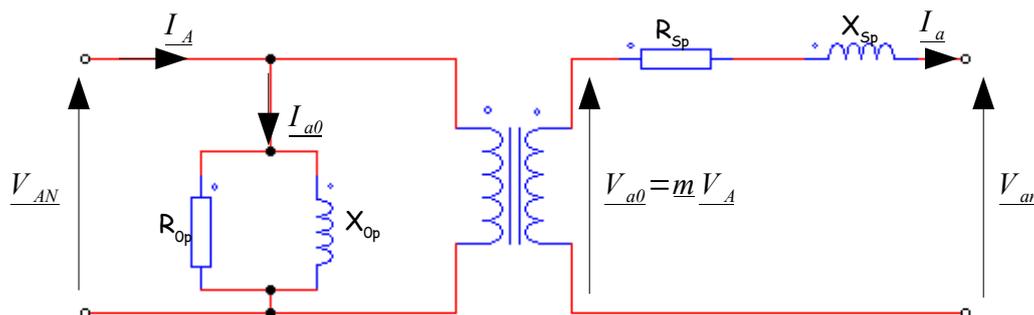


Illustration 4: modèle équivalent par phase du transformateur Yd11



Pour la détermination des éléments du modèle équivalent par phase, on exploite les essais à vide et en court circuit, avec les tensions simples V_{HT} et V_{bt} et les courants lignes I_{HT} et I_{bt} :

Essai à vide :	Essai en court circuit :
$R_{0p} = \frac{V_{HT}^2}{(P_{10}/3)} \quad V_{HT} = V_{AN}$	$R_{Sp} = \frac{(P_{1cc}/3)}{I_{bt}^2} \quad I_{bt} = I_a$
$X_{0p} = L_{0p} \omega = \frac{V_{HT}^2}{(Q_{10}/3)}$	$X_{Sp} = L_{fSp} \omega = \frac{(Q_{1cc}/3)}{I_{bt}^2}$

3.3 IMPÉDANCE DE SORTIE Z_s ET TENSION DE COURT-CIRCUIT $u_{cc} \%$.

La tension de court-circuit d'un transformateur $u_{cc} \%$ est fondamentale quand on veut déterminer le calibre de la protection au secondaire.

$u_{cc} \%$ est le pourcentage entre la tension HT en court-circuit sur la tension HT nominale

$$u_{cc} \% = E_{HTcc} / E_{HTn} .$$

L'impédance de sortie du transformateur Z_s peut être calculée à partir de la tension de court-circuit du transformateur. $u_{cc} \%$. Calcul :

L'essai en court circuit se fait au courant nominal : $E_{btcc} = Z_s I_{bn}$

On peut retenir que : $Z_s = u_{cc} \times \left(\frac{E_{HTn}}{I_{HTn}} \right) = u_{cc} \times \left(\frac{E_{bn}}{I_{bn}} \right)$

Plus le u_{cc} d'un transformateur est faible, plus son impédance de sortie Z_s est faible.

Plus la puissance apparente d'un transformateur est importante, plus son u_{cc} est important.

Pourquoi $Z_s = u_{cc} \times \left(\frac{E_{HTn}}{I_{HTn}} \right) = u_{cc} \times \left(\frac{E_{bn}}{I_{bn}} \right)$? Démonstration : $E_{HTcc} = (1/m_c) \times Z_s I_{bn}$

donc $u_{cc} = (1/m_c) \times Z_s I_{bn} / E_{HTn} = Z_s (I_{bn} / m_c) / E_{HTn} = Z_s (I_{HTn}) / E_{HTn}$

soit en exprimant Z_s , on obtient $Z_s = u_{cc} \times \left(\frac{E_{HTn}}{I_{HTn}} \right) = u_{cc} \times \left(\frac{E_{bn}}{I_{bn}} \right)$



4 MISE EN PARALLÈLE DE TRANSFORMATEURS.

La mise en parallèle permet d'augmenter la puissance disponible en cas de changement de charge.

Cette mise en parallèle permet d'augmenter la puissance disponible, on ne change pas le transformateur en place, on rajoute plutôt un autre transformateur en parallèle : exemple : extension d'un atelier, d'une entreprise.

Ensuite, on adapte le nombre de transformateurs en service en fonction de la puissance à fournir, de façon à utiliser les transformateurs au meilleur de leur rendement.

Pour pouvoir placer 2 transformateurs en parallèle il faut :

- que les transformateurs soient alimentés par le même réseau
- qu'ils aient les mêmes niveaux de tension au primaire et au secondaire,
- qu'ils aient le même indice horaire.
- qu'ils aient même Z_s et U_{cc}

La puissance du plus gros transformateur ne doit pas en outre dépasser deux fois celle du plus petit.

Deux cas de figure se présentent :

- les transformateurs sont identiques
- les transformateurs ont des puissances différentes et ne travaillent pas de la même façon.

LES DEUX TRANSFORMATEURS SONT IDENTIQUES

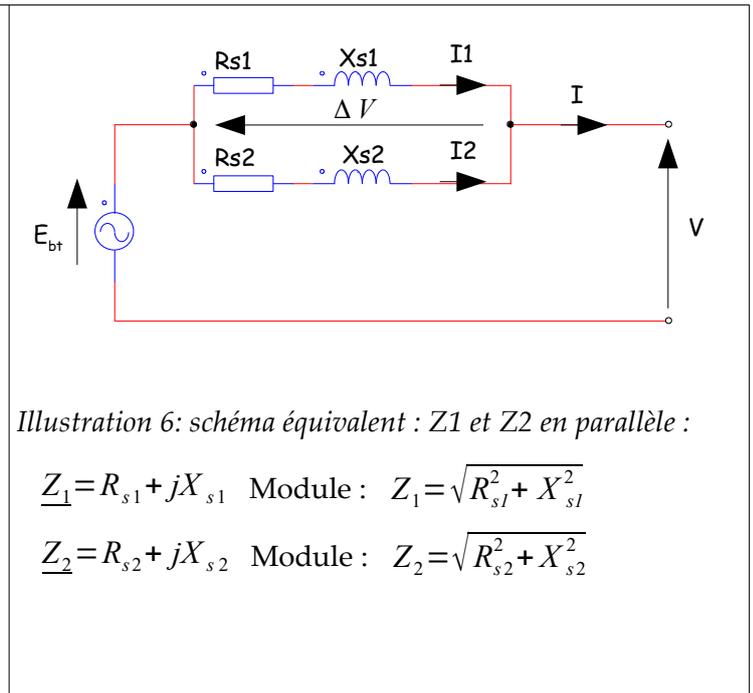
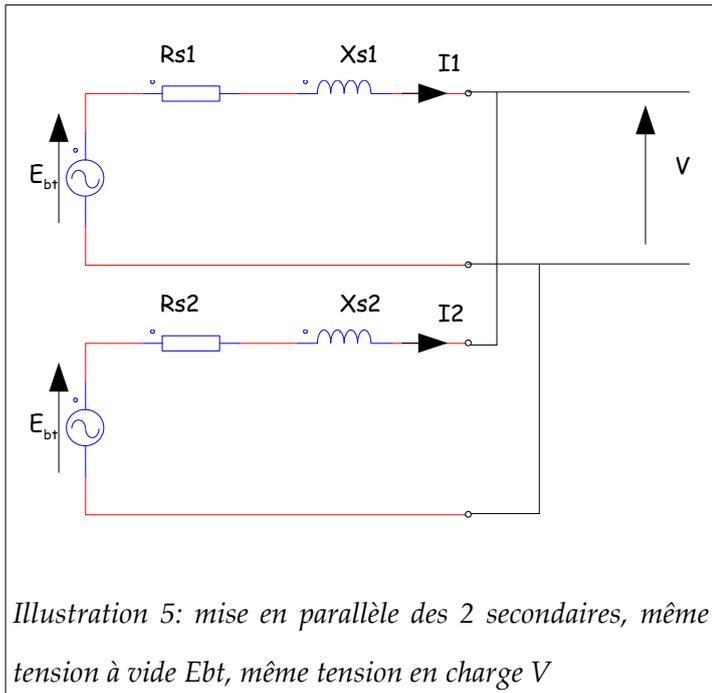
On associe 2 transformateurs de même puissance apparente, même tensions HT, mêmes tensions bt, même $u_{cc} \%$ et de même IH. Conséquence : les impédances secondaires sont identiques, chaque transformateur fournit la moitié de la puissance à la charge.

LES DEUX TRANSFORMATEURS NE TRAVAILLENT PAS DE LA MÊME FAÇON !

Les tensions de court-circuit sont égales à 10 % près.

On tolère une différence inférieure à 0,4 % des tensions entre phases correspondantes au secondaire.

Cas où les $U_{cc} \%$ sont différents :



Dans le cas où les transformateurs mis en parallèle fournissent la même tension à vide et ont le même IH ; si $U_{cc1} \% \neq U_{cc2} \%$ alors $\underline{Z}_1 \neq \underline{Z}_2$. On calcule la chute de tension au secondaire

$\Delta V_1 = \underline{Z}_1 I_1 = \Delta V_2 = \underline{Z}_2 I_2$ cela donne la relation entre les courants de chaque transformateur

$$I_2 = \frac{Z_1}{Z_2} \times I_1 \quad ; \text{ cela se traduit par la relation entre les puissances apparentes : } S_2 = \frac{Z_1}{Z_2} \times S_1$$

- Lorsqu'on associe des transformateurs en parallèle, le transformateur qui aura le ucc le plus faible sera celui qui débitera le plus de courant.

Pour optimiser la puissance fournie par des transformateurs en parallèle, il faut que les transformateurs mis en parallèle soient de puissance apparente identique.



5 TRANSFORMATEURS DANS LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

Le transport de l'électricité se fait en haute tension afin de diminuer le courant circulant dans les lignes, donc de diminuer la section des lignes et les pertes Joules.

Il peut y avoir jusqu'à 7 transformateurs entre un alternateur et un utilisateur.

Quelques chiffres sur les réseaux ...

HT				BT	
10 à 20kV	225/400kV	63/90kV	20kV	230/380V	230V mono
Production EDF, SHEM, ...	Transport (ERDF)				
		entreprise			
		Particuliers			

5.1 CHOIX DU COUPLAGE D'UN TRANSFORMATEUR.

Lors d'un déséquilibre de courant coté secondaire, le choix du couplage doit permettre de limiter les effets coté primaire.

Le déséquilibre de courant peut être provoqué par :

- un court circuit entre 2 phases ou 1 phase et le neutre,
- un déséquilibre de la charge (surchage)

Cas du court-circuit :

Lors d'un court circuit au secondaire il y a un courant très fort qui circule dans une ou deux phases alors que les autres fonctionnent normalement, on risque de saturer le transformateur.

Cas d'un déséquilibre :

- Sans neutre au secondaire, le déséquilibre de la charge va déséquilibrer les tensions disponibles.
- Avec neutre au secondaire, le déséquilibre de la charge va entraîner l'apparition d'un courant dans le neutre (composante homopolaire).
 - Avec ou sans neutre, le déséquilibre en courant, à cause des impédances de ligne, modifiera les tensions disponibles chez l'utilisateur.
 - Il se passera exactement les mêmes phénomènes au primaire.

5.2 COUPLAGES POSSIBLES.

<p>Yy</p>	<p>Un enroulement supporte seulement V ce qui permet d'avoir une section de noyau plus faible. De plus l'isolement des bobinages sera plus facile à réaliser.</p> <p>Ce couplage permet de relier les neutres à la Terre donc de créer une référence de potentiel</p> <p>Les courants primaires sont les images des courants secondaires : le déséquilibre en courant secondaire se reproduit donc au primaire.</p> <p>Utilisé seulement s'il n'y a pas de risque de déséquilibre, sans neutre.</p>
<p>Yd</p>	<p>La composante homopolaire est piégée par le troisième bobinage en triangle.</p>
<p>Dy</p>	<p>Création d'un neutre au secondaire.</p> <p>En cas de court circuit, le courant peut circuler au primaire en se répartissant sur plusieurs phases.</p> <p>Compensation de la composante homopolaire au primaire.</p>



<p>Secondaire zig-zag</p>	<p>Création d'un neutre au secondaire.</p> <p>Le déséquilibre en courant est compensé au secondaire.</p> <p>Utilisé pour alimenter une charge triphasée 4 fils à partir d'un réseau 3 fils sans introduire de déphasage.</p> <p>Utilisé pour alimenter un pont P3 pour éviter la saturation du circuit M à cause de la composante continue des courants alimentant le pont.</p>
---------------------------	---

5.3 COUPLAGES UTILISÉS.

Production	THT	HT	MT	BT
MT				
	dY11		Yy0	<p>S'il y a peu de risque de déséquilibre : Dy_n 11</p> <p>S'il y a risque de déséquilibre : Dz_n 0 ou 10</p>

6 RENDEMENT ET FACTEUR DE DÉCLASSEMENT K

RENDEMENT

Lorsqu'une charge Z est branchée au secondaire du transformateur, elle absorbe la puissance P_2 .

Lors d'un essai à vide sous tension nominale, on mesure P_F .

Lors d'un essai en court-circuit lorsque $I_{2N} = I_{2CC}$, on mesure P_C .

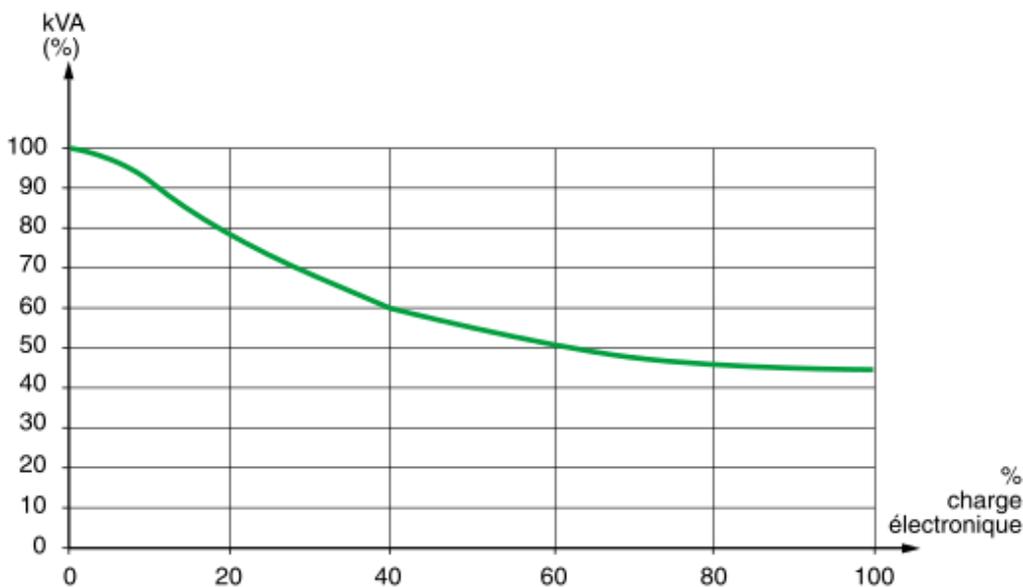
La puissance électrique absorbée au primaire est : $P_1 = P_2 + P_F + P_C$.

Le rendement du transformateur est : $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_C + P_F} \leq 100\%$

rq : plus la puissance apparente du transformateur est grande, plus le rendement se rapproche de 1.

FACTEUR DE DÉCLASSEMENT

La courbe suivante donne le déclassement typique à appliquer à un transformateur alimentant des charges électroniques.



Taux de déclassement à appliquer à un transformateur alimentant des charges électroniques

Lecture de la courbe ci-dessus :

Si le transformateur alimente 80% de charges électroniques, le déclassement vaut 55% soit $k = 0,55$.

Le guide UTE C15-112 fournit un facteur de déclassement des transformateurs en fonction des courants harmoniques