

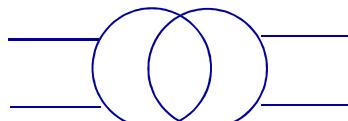
### Transformateurs monophasés

#### Rôle

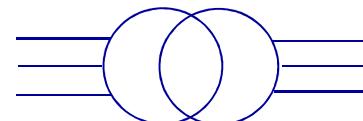
Les transformateurs sont utilisés pour adapter (élever ou abaisser) une tension aux besoins de l'utilisation.



#### Symbol

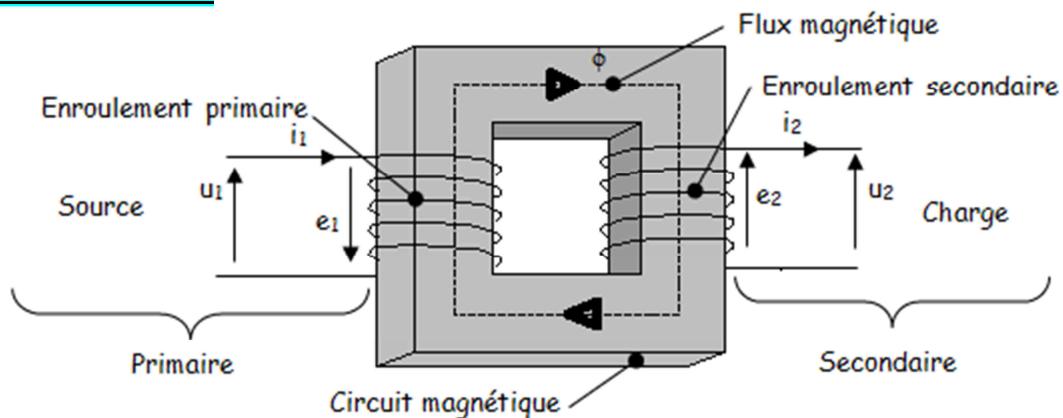


Transformateur monophasé



Transformateur triphasé

#### Principe de fonctionnement



Il est constitué de 2 enroulements placés sur un circuit magnétique fermé :

- **Le primaire** est alimenté par le réseau et se comporte comme un récepteur. Il crée un champ et un flux magnétique ( $\Phi(t)$ ) alternatif dans le circuit magnétique feuilleté.
- **Le secondaire** est soumis à la variation de ce flux, il est le siège d'une f.e.m. induite due à la loi de Lenz ( $e = - N \frac{d\Phi}{dt}$ ) et alimente la charge.

Un transformateur qui produit une tension plus grande est dit élévateur de tension, à l'inverse il est dit abaisseur de tension.

#### Transformateur parfait

##### Hypothèses simplificatrices

- Circuit magnétique fermé de perméabilité infinie (pas de fuites de flux et pas de pertes de fer).
- Enroulements primaire et secondaire de résistance nulle (pas de pertes par effet joule dans les enroulements).

##### Relations entre les tensions

A chaque instant, chaque spire est traversée par le même flux magnétique.

##### Au primaire

$$e_1 = - N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{et} \quad u_1 = - e_1 \quad \underline{U}_1 = - \underline{E}_1 = j \omega N_1 \underline{\Phi} \quad (1)$$

##### Au secondaire

$$e_2 = - N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{et} \quad u_2 = e_2 \quad \underline{U}_2 = \underline{E}_2 = - j \omega N_2 \underline{\Phi} \quad (2)$$

On tire immédiatement :  $\frac{u_2}{u_1} = -\frac{e_2}{e_1} = -\frac{N_2}{N_1} = -m$

Cette relation indique que les tensions  $u_1$  et  $u_2$  sont en opposition de phase.

La relation entre les valeurs efficaces  $U_1$  et  $U_2$  ne tient pas compte du déphasage :  $m = \frac{U_2}{U_1}$

**m** est le rapport de transformation du transformateur.

L'équation (1)  $U_1 = j\omega N_1 \Phi$  donne en valeur efficace :  $U_1 = E_1 = \omega N_1 \Phi = 2\pi f N_1 \Phi_{\max} / \sqrt{2} = 4,44 f N_1 \Phi_{\max}$

$U_1 = 4,44 f N_1 s B_{\max} \quad \text{et} \quad U_2 = 4,44 f N_2 s B_{\max} \rightarrow \text{Formule de Boucherot}$

Où  $U$ ,  $E$  (valeurs efficaces) en (V),  $B$  (champ magnétique) en Tesla (T),  $s$  (section de fer) en ( $m^2$ ) et  $f$  (fréquence) en (Hz).

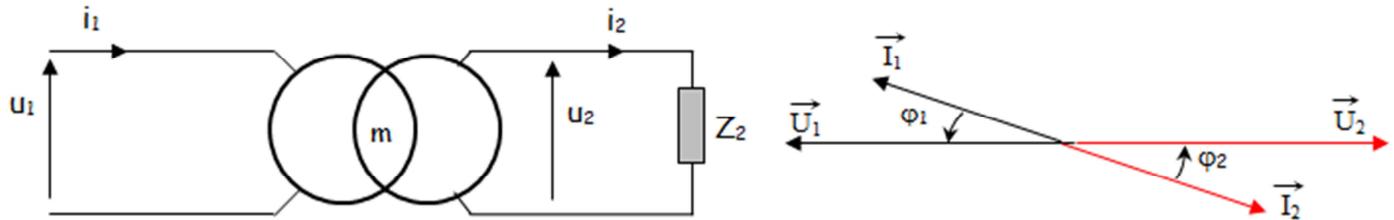
### Relations entre les intensités

Bilan des puissances :  $P_1 = P_2$  (transformateur parfait) soit le rendement est :  $\eta = P_2 / P_1 = 1$

Comme  $\phi_1 = \phi_2$  on a :  $S_1 = S_2 = U_1 I_1 = U_2 I_2 \Rightarrow m = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$

### Schéma électrique équivalent et diagramme de Fresnel

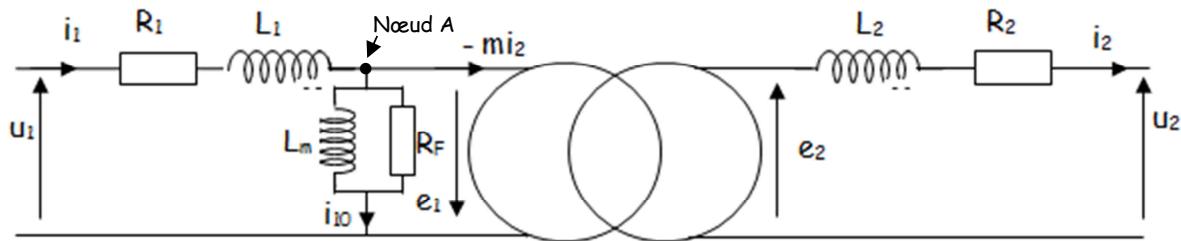
Un transformateur parfait est alimenté au primaire par une tension sinusoïdale  $u_1$ . Il alimente une charge  $Z_2$ , telle que le courant  $i_2$  présente un déphasage d'un angle  $\phi_2$  avec la tension  $u_2$ .



L'intensité du courant  $I_2$  dépend de la charge appliquée au secondaire, il en est de même pour le facteur de puissance  $\cos \phi_2$ . Ces deux grandeurs imposent l'intensité du courant  $I_1$  appelé au primaire, ainsi que le facteur de puissance du primaire, sachant que  $\phi_1 = \phi_2$ .

### Transformateur réel

En éliminant toutes les hypothèses précédentes :



### Relations entre les tensions

Le circuit du primaire peut se mettre en équation comme suit :  $U_1 = -E_1 + R_1 I_1 + j L_1 \omega I_1$

Le circuit du secondaire peut se mettre en équation comme suit :  $U_2 = E_2 - R_2 I_2 - j L_2 \omega I_2$

### Relations entre les intensités

La loi des nœuds en A s'écrit :  $i_1 = i_{10} - \frac{N_2}{N_1} i_2 = i_{10} - m i_2$

Avec  $i_{10}$ , intensité du courant absorbé par le primaire du transformateur à vide.

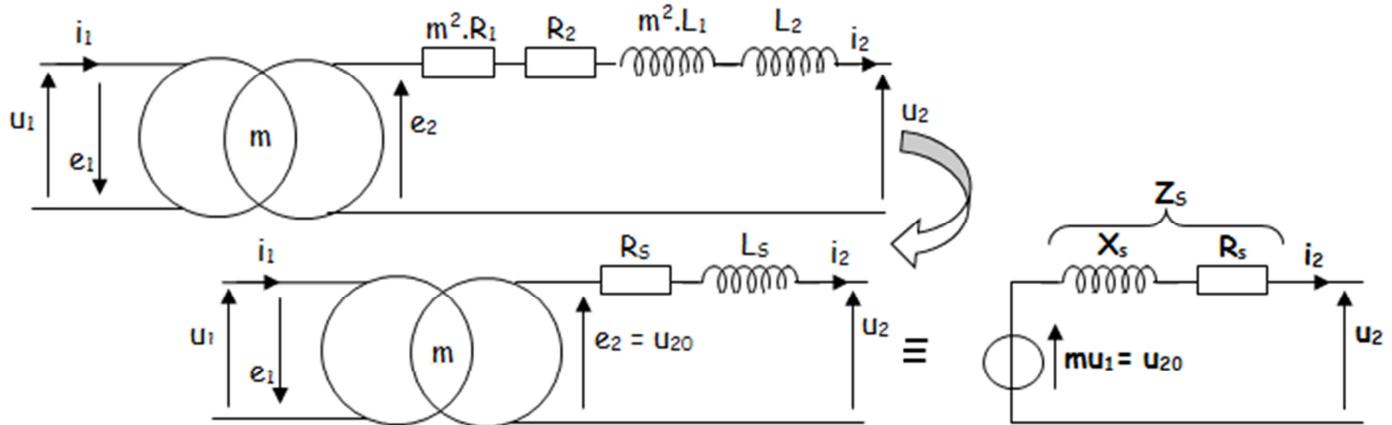
## Comportement simplifié dans l'hypothèse de Kapp

L'hypothèse de Kapp permet de négliger le courant  $i_{10}$  vis à vis de  $i_1$  si bien que  $i_1$  et  $i_2$  sont dans le rapport de transformation.

## Schéma équivalent simplifié ramené au secondaire :

Le modèle de Thévenin équivalent au transformateur vu du secondaire consiste à ramener tous les éléments du transformateur sur le circuit du secondaire.

Connaissant la charge, il sera aisément de calculer les paramètres électriques du transformateur complet. Les éléments  $R_1$  et  $X_1 = L_1 \cdot \omega$  peuvent être déplacés au secondaire en les multipliant par  $m^2$ , ainsi :



Le secondaire se comporte comme une source :

- de tension :  $mU_1 = U_{20}$  et
- d'impédance  $Z_s = \sqrt{(X_s^2 + R_s^2)}$  avec :  $R_s = (R_2 + m^2 R_1)$  et  $X_s = (X_2 + m^2 X_1)$

On peut écrire l'équation du transformateur ramenée au secondaire :  $U_2 = U_{20} - (R_s + jX_s) I_2$

En valeur efficace :  $U_2 = U_{20} - \Delta U_2$  avec  $\Delta U_2$  valeur approchée de la chute de tension au secondaire.

## Calcul approché de la chute de tension au secondaire :

Le calcul de la chute de tension peut être alors réalisé à l'aide d'une formule approchée :

$$\Delta U_2 = R_s \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + X_s \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2$$

## Détermination des éléments $R_s$ et $X_s$ :

A partir de ces deux essais: *essai à vide* et *essai en court-circuit*

### Essai à vide

Pour  $U_1 = U_{1N}$ , on mesure  $U_{20}$  et  $P_{10}$ . On calcule :

le rapport de transformation du transformateur

$$\text{On tire : } m = \frac{U_{20}}{U_1}$$

Puisque  $I_{10}$  est très faible donc  $P_{J10} \ll P_{10}$ .

Finalement : essai à vide  $P_{10} = P_{\text{fer}}$

### Essai en court-circuit

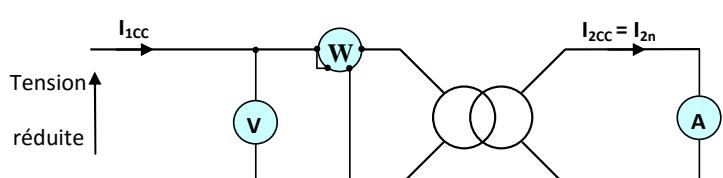
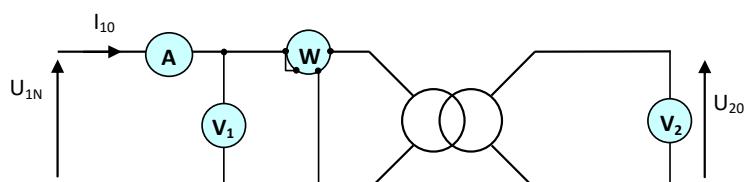
Cet essai doit être réalisé sous **tension réduite**

$U_{1CC}$  (sinon destruction du transformateur)

Pour  $I_{2CC} = I_{2n}$ , on mesure :  $U_{1CC}$  et  $P_{1CC}$ .

On calcule alors :  $R_s = P_{1CC} / I_{2CC}^2$

$$Z_s = mU_{1CC} / I_{2CC} \quad \text{et} \quad X_s = \sqrt{(Z_s^2 - R_s^2)}$$



## Rendement du transformateur

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

### Méthode directe

Cette méthode consiste à mesurer avec deux wattmètres  $P_1$  et  $P_2$ . Soit  $\eta = P_2/P_1$

### Méthode indirecte ou méthode des pertes séparées

Cette méthode consiste à évaluer les différentes pertes dans les conditions nominales d'utilisation.

$$\text{Soit } \eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos\varphi_2}{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos\varphi_2 + P_{10} + R_s \cdot I_2^2}$$

**Remarque :** le rendement est maximal lorsque pertes fer et pertes cuivre sont identiques.

## Transformateurs triphasés

Dans le transport et la distribution de l'énergie électrique, on utilise des transformateurs triphasés de grande puissance. Ils sont installés dans :

- les centrales ;
- les postes d'interconnexion ;
- de distribution ;
- sur les poteaux ;
- dans les zones de distribution.

On peut considérer dans le principe de fonctionnement qu'un transformateur triphasé est équivalent à trois transformateurs monophasés.

La différence tient essentiellement aux modes de couplage des enroulements des transformateurs triphasés.

## Exemple de transformateurs

Transformateur de type immergé



Transformateur de type sec enrobé



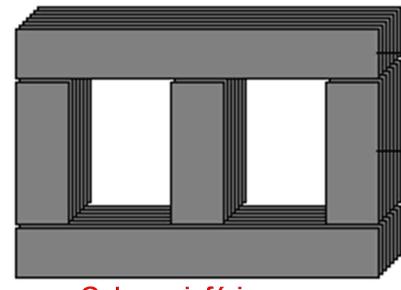
## Constitution

### Circuit magnétique

Le circuit magnétique canalise le flux magnétique. Il est constitué d'un empilage de tôles. Ces tôles sont :

- Isolées entre elles par oxydation (diminutions des pertes par courant de Foucault) ;
- à cristaux orientés (diminution des pertes par hystéresis) ;
- assemblées en alterné pour limiter l'entrefer (réductions des fuites magnétiques).

Culasse supérieure



Culasse inférieure

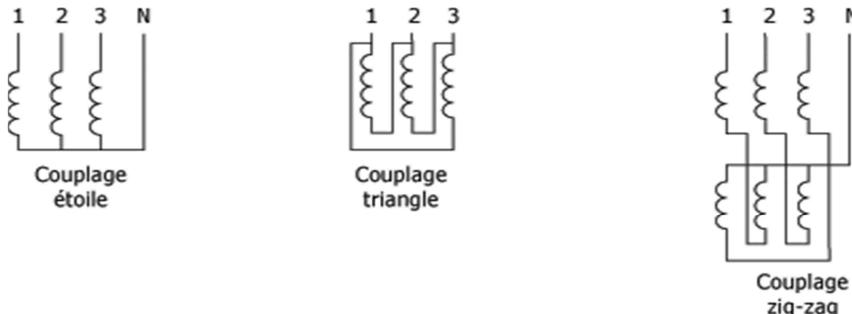
## Circuit électrique

Il comprend les enroulements primaires et secondaires ainsi que les éléments permettant les connexions avec les circuits extérieurs. Pour les transformateurs triphasés, il y a 3 enroulements primaires et 3 enroulements secondaires.



## Couplage des enroulements

Comme tous les récepteurs triphasés, le primaire d'un transformateur peut avoir ses enroulements couplés en étoile ou en triangle. De la même façon, les bobines secondaires pourront être connectées en étoile, en triangle ou en zig-zag.



Par convention :

- les bornes haute tension sont repérées par des lettres majuscules : A, B, C.
- les bornes basse tension sont repérées par des lettres minuscules : a, b, c.

1 <sup>ère</sup> lettre (majuscule) couplage primaire			2 <sup>ème</sup> lettre (minuscule) couplage secondaire			3 <sup>ème</sup> lettre neutre sorti	Indice horaire
Etoile	Triangle	Zig zag	Etoile	Triangle	Zig zag		
Y	D	Z	y	d	z	N ou n	0, 1, 2, ..., 11

## Rapport de transformation

Par définition :

$$M = U_{ab}/U_{AB}$$

Ce rapport dépend non seulement des nombres de spires primaires et secondaires, mais aussi des couplages au primaire et au secondaire.

Yy et Dd	Yd	Dy
$M = N_2/N_1$	$M = (N_2/N_1)/\sqrt{3}$	$M = \sqrt{3}(N_2/N_1)$

## Indice horaire

Les conditions de couplage des enroulements primaires et secondaires ont aussi pour effet d'introduire un déphasage entre des tensions primaires et secondaires et homologues, c'est à dire apparaissant entre les bornes désignées par des mêmes lettres ( $V_A, V_a$ ) ou ( $U_{AB}, U_{ab}$ ).

En pratique, le déphasage  $\theta$  obtenu est toujours un multiple entier de  $\pm 30^\circ$ .

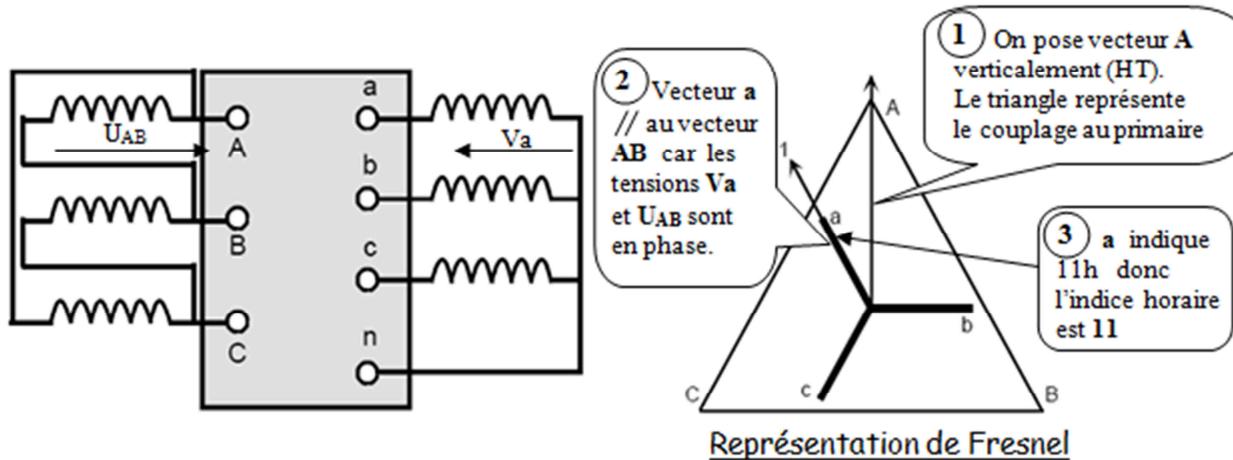
$\theta = \text{retard d'une tension BT sur son homologue HT.}$

L'indice horaire  $I$  est :

$$I = \theta/30^\circ$$

$$0 \leq I \leq 11 \text{ (entier)}$$

Détermination de l'indice horaire à partir du schéma de couplage du transformateur



Donc la désignation de ce transformateur est Dyn11

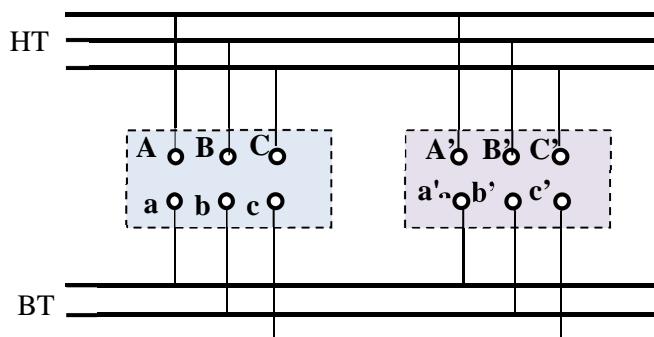
### Caractéristiques d'un transformateur triphasé

La plaque signalétique d'un transformateur donne les principales caractéristiques électriques :

- La puissance assignée (en KVA).
- Les tensions primaire et secondaire assignées (en V ou KV).
- Les courants primaire et secondaire assignés (en A ou KA).
- La fréquence d'emploi (50 Hz).
- Les couplages côtés HT et BT.
- L'indice horaire.
- La tension de court-circuit (pourcentage de la tension primaire assignée pour obtenir le courant nominal au secondaire, lorsque le secondaire est en court-circuit).
- Le mode de refroidissement.

### Conditions de couplage en parallèle

Des transformateurs sont en parallèle lorsque leurs primaires sont alimentés par un même réseau et leurs secondaires connectés à une même ligne ou débitent dans une même charge.



Pour cela il faut que :

- Les transformateurs soient alimentés sous la même tension.
- Les rapports de transformations à vide soient identiques.
- Les tensions de court-circuit égales à 10 % près.
- Mêmes indice horaire de couplage ou indices compatibles.

### Groupes d'indices horaires

En pratique, on peut aisément modifier l'indice horaire d'un transformateur en effectuant une permutation circulaire des lettres affectées aux bornes : toute permutation correspond à une augmentation ou à une diminution de 4 de la valeur de l'indice horaire.

On pourra donc coupler en parallèle sans difficulté des transformateurs dont les indices diffèrent de  $\pm 4$ .

Groupe	Indices	Couplages
I	0, 4, 8	Yy - Dd - Dz
II	2, 6, 10	Yy - Dd - Dz
III	1, 5	Dy - Yz - Yd
IV	7, 11	Dy - Yz - Yd

## Couplages normalisés

TABLEAUX DES PRINCIPAUX COUPLAGES

