

# LE TRANSFORMATEUR

A chaque fois que l'on doit modifier ou adapter une tension alternative, on utilise un transformateur.

## 1) GÉNÉRALITÉS

### 1.1) APPROCHE FONCTIONNELLE



Le transformateur est une machine statique qui permet de modifier des grandeurs sinusoïdales (tensions, intensités) sans en changer la fréquence.

**Adaptation de tension:** transformateur abaisseur ou élévateur

**Isolation galvanique:** transformateur d'isolation

### 1.2) PRINCIPE ET CONSTITUTION DES TRANSFORMATEURS

#### 1.2.1) Principe

On place deux enroulements sur un circuit magnétique. Lorsque l'enroulement primaire est traversé par un courant alternatif, il crée un flux alternatif dans le circuit magnétique. Ce flux variable crée aux bornes de l'enroulement secondaire une force électromotrice. Si on place un récepteur aux bornes du secondaire, un courant alternatif parcourt le circuit. La puissance transite du primaire au secondaire grâce à la variation de flux.

#### 1.2.2) Constitution

Le transformateur est une machine d'induction qui comporte principalement un circuit magnétique, un circuit électrique et des organes mécaniques (support, protection, manutention, refroidissement).

### 1.3) CLASSIFICATION DES TRANSFORMATEURS

- Petits transformateurs (puissance inférieure à 25 kVA): installations pour adapter les tensions:  $400V \Rightarrow 230V$ ,  $230V \Rightarrow 24V$ .

- Transformateurs de distribution (puissance comprise entre 25 kVA et 2500 kVA): les lotissements, les lycées, les industries.

- Transformateurs pour le transport d'énergie (puissance supérieure à 2500 kVA, pouvant aller jusqu'à 1000 MVA)

### 1.4) RELATIONS ÉLECTROTECHNIQUES

#### 1.4.1) Loi de Lenz

$$U_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \qquad U_2 = - N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

#### 1.4.2) Formule de Boucherot

$$U_1 = 4,44 \cdot S \cdot N_1 \cdot B \cdot f \qquad U_2 = 4,44 \cdot S \cdot N_2 \cdot B \cdot f$$

#### 1.4.3) Rapport de transformation

$$N_1 I_1 + N_2 I_2 = Rf = 0 \qquad m = - \frac{N_2}{N_1} = - \frac{U_2}{U_1} = - \frac{I_1}{I_2}$$

#### 1.4.4) Rendement

$$h = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1}$$

**Transformateur parfait:** pas de perte cuivre, pas de perte fer.  $\eta = 1$

**Transformateur réel:**

- perte cuivre, Joule,  $Ri^2$ ,
- perte fer, Courant de Foucault.

$$h = \frac{P_2}{P_2 + \text{pertes}}$$

## 2) CIRCUIT MAGNÉTIQUE

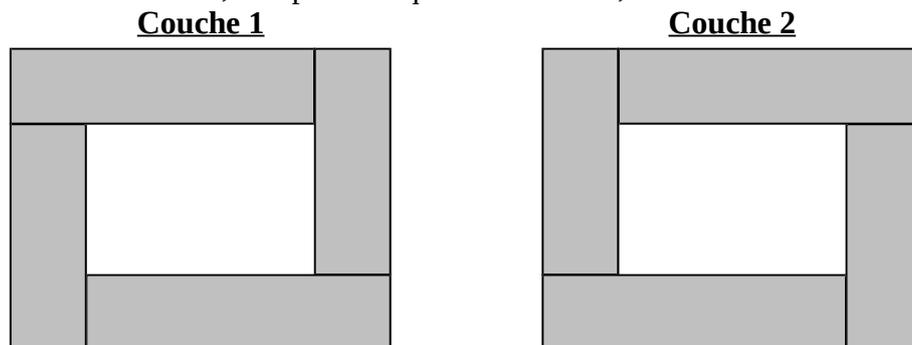
Le circuit magnétique permet de canaliser le flux électromagnétique et de limiter les pertes fer.

### 2.1) CONSTITUTION ET FORMES

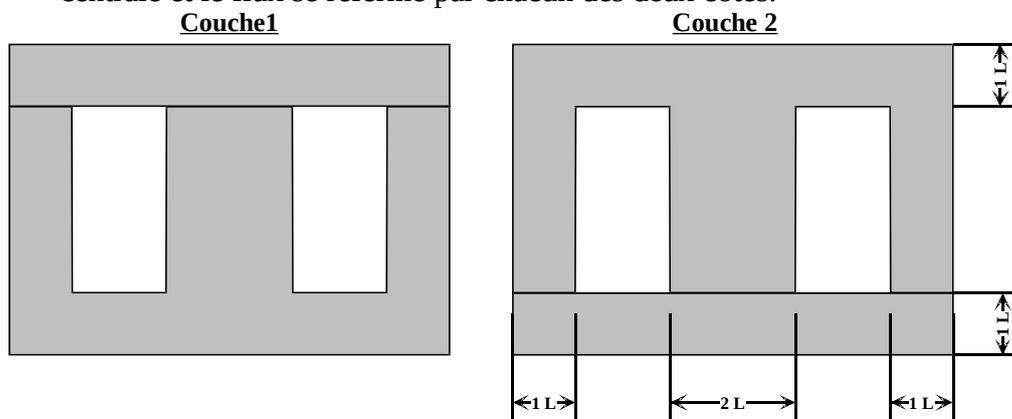
Le circuit magnétique est constitué de colonnes supportant les enroulements et de culasses fermant le circuit. On empile des tôles magnétiques dites « à cristaux orientés ».

#### 2.1.1) Le transformateur monophasé

- Deux colonnes, une pour chaque enroulement,

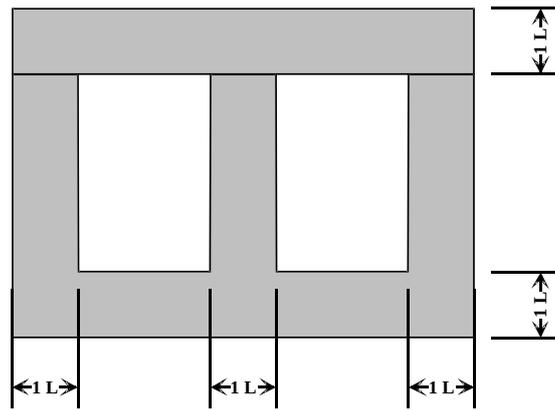


- De forme cuirassée, on place les enroulements sur une colonne centrale et le flux se referme par chacun des deux côtés.



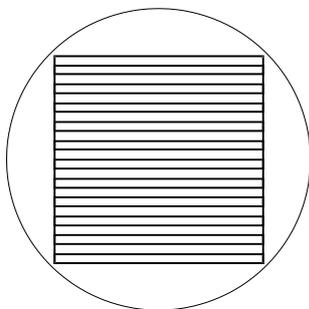
#### 2.1.2) Le transformateur triphasé

Le circuit comprend 3 colonnes placées dans un même plan et fermées par deux culasses horizontales.

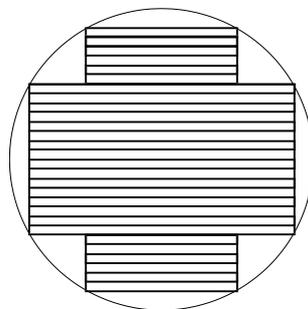


## **2.2) SECTION DES COLONNES**

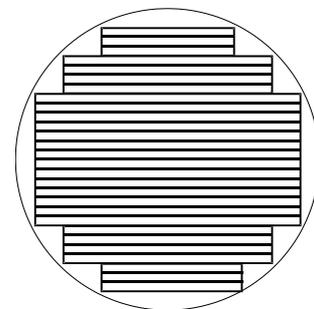
Pour les faibles puissances, les sections sont carrées. Pour les fortes puissances, on réalise des sections circulaires avec des architectures en gradins. Comme les conducteurs des bobinages peuvent être de forte section, la fabrication est plus facile et on a une meilleure tenue aux effets électrodynamiques entre spires.



Section carrée



Section à un gradin



Section à deux gradins

## **2.3) L'ASSEMBLAGE**

Le serrage des culasses et l'assemblage des colonnes sont obtenus grâce à des matériaux non magnétiques ou isolés. Le bruit et les vibrations du transformateur dépendent essentiellement de cet assemblage.

L'assemblage des colonnes et des culasses doivent réduire le plus possible la réluctance du circuit et favoriser sa tenue mécanique. On utilise deux techniques: les joints enchevêtrés (les extrémités des tôles et des culasses sont enchevêtrées les unes avec les autres) ou les joints à coupe oblique (les joints sont coupés à 45°).

## **2.4) MATÉRIAUX EMPLOYÉS**

*Voir cours sur les matériaux magnétiques.*

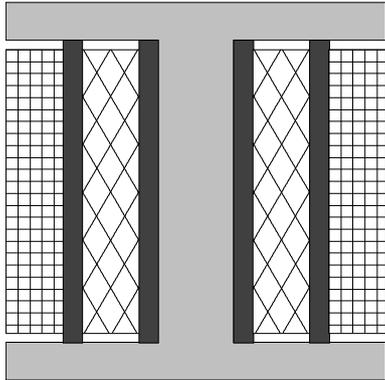
- Tôles d'acier au silicium, pertes 1 à 1,6 W/kg,
- Tôles à cristaux orientés, pertes 0.55 W/kg.

Les tôles à cristaux orientés sont obtenues par un laminage à froid suivi d'un traitement thermique. Elles ont un meilleur rendement et permettent de réduire sensiblement la taille d'un transformateur. Les tôles en général sont isolées sur une face par oxydation.

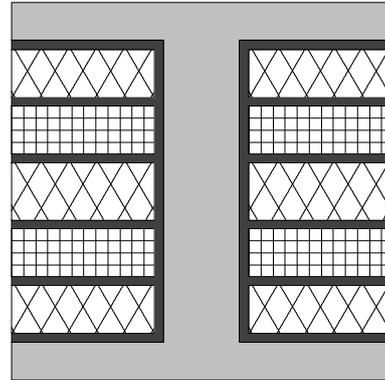
### 3) CIRCUIT ÉLECTRIQUE

Il est constitué par les enroulements primaires et secondaires et leur isolement. On distingue l'enroulement HT de l'enroulement BT que le transformateur soit élévateur ou abaisseur.

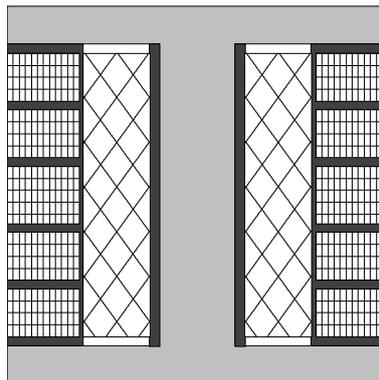
#### 3.1) DISPOSITION DES ENROULEMENTS



Bobinage concentrique ou en tonneau utilisé pour les petits transformateurs



Bobinage en galettes (enroulements BT et HT alternés)



Bobinage mixte (enroulements BT près du fer).

#### 3.3) NOMBRE DE SPIRES ET SECTION DES CONDUCTEURS

##### Nombre de spires au primaire

Le nombre de spires au primaire est donné par la formule de Boucherot.

$$N_1 = \frac{U_1 \cdot 10^4}{4,44 \cdot B \cdot s \cdot f}$$

$U_1$ : tension primaire en V, B: induction en T, s: section du noyau en cm<sup>2</sup>,

f: fréquence en Hz, N1: nombre de spires.

Les valeurs de 1 ou 1,2 T sont les plus couramment utilisées.

##### Nombres de spires au secondaire

Il est obtenu à partir du rapport de transformation.

$$m = \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

##### Section des conducteurs

La section des conducteurs se détermine par la densité de courant.

### **3.2) PROBLÈMES D'ISOLEMENT**

Il est nécessaire de bien isoler les enroulements entre eux et par rapport à la masse. On utilise du vernis et du papier isolant.

#### **3.2.1) Ecran**

Un écran isolant est placé entre la masse et les bobinages ou entre les bobinages H.T. et B.T. De plus on place une spire ouverte reliée à la masse entre la H.T. et la B.T. pour éviter la propagation des parasites.

#### **3.2.2) Traversées isolantes**

Elles assurent la liaison entre les enroulements et la ligne extérieure.

#### **3.2.3) Les diélectriques.**

Le diélectrique doit assurer l'isolement sans perturber le refroidissement du transformateur.

Selon les tensions appliquées aux enroulements, l'isolation peut être assuré par:

- de l'air pour les petits transformateurs B.T,
- de l'huile (très employée dans tous les transformateurs de puissance, mais risques d'incendie et d'explosion),
- du pyralène ou diélectrique chloré qui est incombustible (interdit en France car, porté au-delà de 3000 degrés, il se transforme en Dioxine, poison très dangereux).
- du quartz (sable qui étouffe les flammes mais qui rend le refroidissement plus difficile).

## 4) ORGANES MÉCANIQUES

### 4.1) CUVE ET COUVERCLE

Ils assurent plusieurs fonctions:

- protection mécanique de la partie active,
- contenance du diélectrique et son refroidissement,
- support du circuit magnétique,
- fixation permettant la manutention.

### 4.2) LE REFROIDISSEMENT

Les pertes dans le circuit magnétique (Hystérésis et courant de Foucault) et dans le cuivre (effet Joule) provoquent des échauffements. Pour éviter la détérioration des isolants, les transformateurs doivent être refroidis convenablement.

#### 4.2.1) Les transformateurs secs

Le transformateur est placé dans une enceinte grillagée. La ventilation est une convection naturelle ou forcée.

#### 4.2.2) Les transformateurs immergés

Ces transformateurs ont différents types de refroidissement:

- refroidissement naturel par radiateur d'huile: la cuve est munie d'ailettes et l'huile se refroidit au contact des parois.
- refroidissement par circulation d'huile forcée: l'huile circule dans le radiateur de manière naturelle ou forcée, ce radiateur peut être ventilé par un ventilateur extérieur.
- refroidissement par hydroréfrigérant: la circulation de l'huile s'effectue dans une cuve contenant des tubes, à l'intérieur desquels circule de l'eau froide

#### 4.2.3) Désignation du refroidissement

Un groupe de quatre lettres permet de codifier le type de refroidissement du transformateur.

<b>1<sup>ère</sup> lettre</b>		<b>2<sup>ème</sup> lettre</b>		<b>3<sup>ème</sup> lettre</b>		<b>4<sup>ème</sup> lettre</b>	
<b>Nature du diélectrique</b>		<b>Mode de circulation du diélectrique</b>		<b>Fluide de refroidissement</b>		<b>Mode de circulation du fluide</b>	
<b>O</b>	Huile minérale	<b>N</b>	Naturel	<b>O</b>	Mêmes symboles que la 1 <sup>ère</sup> lettre	<b>N</b>	Mêmes symboles que la 2 <sup>ème</sup> lettre
<b>L</b>	Diélectrique chloré	<b>F</b>	Forcée	<b>L</b>			
<b>G</b>	Gaz	<b>D</b>	Forcée et dirigée dans les enroulements	<b>G</b>			
<b>A</b>	Air			<b>A</b>			
<b>S</b>	Isolant solide			<b>S</b>			

Exemple: ONAN: transformateur immergé dans l'huile, à circulation naturelle, refroidie par air à circulation naturelle.

Autres exemples: ANAN, ONAN, OFAF, OFLF.

### **4.3) ACCESSOIRE DE PROTECTION**

Ces accessoires surveillent le fonctionnement du transformateur, avertissent d'une évolution dangereuse et limitent les dégâts en cas d'avarie.

#### **4.3.1) Préservation de l'huile**

Un circuit permet de compenser les dilatations du circuit de refroidissement et d'éviter l'oxydation de l'huile au contact avec l'air.

Un réservoir d'expansion assure cette fonction. Il est mis en contact avec l'air à travers un assécheur d'air à joint d'huile. Un thermomètre à contact et un contrôleur de niveau complète cet équipement.

#### **4.3.2) Relais Buchholz**

Ce relais met hors tension le transformateur en cas de dégagement gazeux plus ou moins important provenant de la décomposition d'isolants solides ou liquides sous l'action de la chaleur ou d'un arc électrique. En cas de défaut, deux contacts peuvent fonctionner:

- alarme pour les faibles avaries (vieillessement de l'isolant entre quelques spires),
- déclenchement du disjoncteur amont pour les dégagements violents (court-circuit au secondaire).

#### **4.3.3) Cheminée d'explosion**

Un diaphragme de verre permet en cas d'incident grave d'évacuer les surpressions dangereuses pour la cuve.

#### **4.3.4) Transformateur étanche**

Pour les transformateurs de distribution, on utilise des transformateurs étanches où la cuve se dilate avec le diélectrique:

- Pas d'entretien,
- Pas de contact entre le diélectrique et l'air ambiant
- Plus de conservateur ni d'assécheur d'huile

## 5) PUISSANCE À INSTALLER

Un transformateur doit être adapté à l'utilisation. Trop faible, il s'échauffe anormalement. Trop fort, les pertes à vide excessives sont inutiles.

### 5.1) ESTIMATION DES PUISSANCES

Elle s'effectue en relevant toutes les puissances des récepteurs ou par une estimation globale à l'aide de tableaux.

#### 5.1.1) Facteurs de minoration (donnés par la norme)

- a) Coefficient d'utilisation: certains récepteurs n'appellent pas en permanence leur puissance maximale (prises de courant).
- b) Facteur de simultanéité: tous les récepteurs ne fonctionnent en même temps.

#### 5.1.2) Facteur de majoration

- a) Le  $\cos \varphi$ : lorsque le  $\cos \varphi$  est trop faible ( $< 0,857$ ) l'EDF pénalise les abonnés (*Voir cours sur l'amélioration du facteur de puissance*).

*Exemple :*

- 10kW de résistances : transformateur de 10kVA
- moteur de 10kW avec un  $\cos\phi=0,7$  : transformateur de 14kVA

- b) Autres facteurs: (donnés par le constructeur)

- la température,
- l'installation à une altitude supérieure à 1000m,
- surcharge prévisible.

## **6) COUPLAGE DES TRANSFORMATEURS**

Pour des raisons de continuité ou de variation de consommation d'énergie, on est amené à coupler des transformateurs en parallèle.

### **6.1) CONDITION DE COUPLAGE.**

a) Puissance: la puissance totale disponible est la somme des puissances de tous les transformateurs. La puissance du plus gros ne doit pas dépasser 2 fois la puissance du plus petit. Pour des transformateurs de même puissance, ils doivent être de la même série et fabriqués de la même matière de cuivre.

b) Réseau: les transformateurs doivent être alimenté par le même réseau.

c) Connexions (jeux de barres): mêmes longueurs de connexion, surtout coté B.T.

d) Indice horaire: même indice horaire de couplage des enroulements

e) Tension de court circuit: elles doivent être égales à 10% près.

f) Tension secondaire: les tensions au secondaire ne doivent différer que très peu (maximum: 0,4%). En général, les transformateurs sont munis d'un commutateur d'ajustement pour la tension primaire (-5, 0, +05%)

### **6.2) COUPLAGE DES ENROULEMENTS**

#### **6.2.1) Couplage ÉTOILE**

Il permet la sortie du point neutre très utile en B.T.. Le couplage étoile permet la sortie du neutre et est très utile en BTA. On a donc deux tensions disponibles: tension simple ou tension composée.

#### **6.2.2) Couplage TRIANGLE**

Le couplage triangle nécessite plus de spires par colonne que l'enroulement étoile (pas de neutre sorti).

#### **6.2.3) Couplage ZIG-ZAG**

Chaque enroulement comprend une demie bobine sur des noyaux différents. Les f.e.m. sont déphasée de 120° électriques. Utilisé au secondaire, on obtient une meilleure répartition des tensions en cas de réseau déséquilibré. Il permet la sortie du neutre

### **6.3) REPRÉSENTATION DES ENROULEMENTS**

#### **6.3.1) Représentation schématique**

La représentation schématique des enroulements se fait de part et d'autres du couvercle.

Coté H.T.: vers le bas et en majuscules (A, B, C)

Coté B.T.: vers le haut et en minuscules (a, b, c)

### 6.3.2) Désignation des couplages

Elle s'effectue par un groupe de deux ou trois lettres et un chiffre.

1<sup>ère</sup> lettre (majuscule): couplage côté H.T.

Y: Etoile

D ou  $\Delta$ : Triangle

2<sup>ème</sup> lettre ( minuscule): couplage côté B.T.

y: Etoile

d: Triangle

z: Zigzag

On peut rajouter la lettre « n » si le neutre est sorti.

Le chiffre indique l'indice du couplage, c'est-à-dire, l'angle de déphasage entre la tension primaire et la tension secondaire. Cet angle horaire correspond, pour  $360^\circ$ , aux 12 heures du cadran repérées de 0 à 11, chaque angle horaire est un multiple de  $30^\circ$ .

#### Exemples:

Dyn11: couplage H.T. en triangle, couplage B.T. en étoile avec neutre sorti, déphasage de  $330^\circ$  ( $11 \times 30$ ) entre le primaire et le secondaire.

Yz 11: couplage H.T. en étoile, couplage B.T. en zigzag, déphasage de  $330^\circ$  ( $11 \times 30$ ) entre le primaire et le secondaire.

Les couplages les plus utilisés sont Yy0, Dy11, et Yz11.

## 5) EXEMPLE D'APPLICATION

### TRANSFORMATEUR DE DISTRIBUTION HTA/BT 400 KVA DE MARQUE FRANCE TRANSFO (MERLIN-GÉRIN).

#### Masse:

1545 kg dont cuve et structure (360 kg), enroulements (200kg), huile isolante (335 kg).

#### Plaque signalétique:

puissance: 400kVA  
type ERI (Etanche à Remplissage Intégral)  
primaire: 15kV / 15,4A  
secondaire 410V / 577,4A  
couplage: Dyn11  
 $U_{cc} = 4\%$

#### Interprétation:

- ➔ La puissance du transformateur est  $S_n = 400$  kVA. Elle s'obtient en appliquant:  $S_n = U_1 I_1 \sqrt{3} = U_{20} I_{2N} \sqrt{3}$
- ➔ La tension primaire est  $U_1 = 15$  kV (entre phases). Cette tension est ajustable (de 2,5 à 5 %) selon l'implantation du transformateur dans le réseau de distribution.
- ➔ La tension secondaire est  $U_{20} = 410$  V (entre phases). C'est la tension à vide. En charge, cette tension se rapproche de 400V.
- ➔ Le courant absorbé au primaire est  $I_1 = 15,4$  A.
- ➔ Le courant absorbé au secondaire est  $I_{2N} = 577$  A.
- ➔ La tension de court-circuit  $U_{cc}$  est une caractéristique importante.  $U_{cc}$  est la valeur de la tension qui faut appliquer entre les bornes du transformateur côté primaire pour que circule le courant assigné au secondaire lorsque celui-ci est en court-circuit.  $U_{cc}$  caractérise l'impédance interne du transformateur et permet le calcul des courants de court-circuit.  $U_{cc} = 15\ 000 \times 0,04 = 600$  V.