

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

## Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER PROFESSIONNEL

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

**Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE**

*Présenté par*  
**Djamel MEDJOUTI**

Thème

# Dimensionnement et réalisation d'un transformateur triphasé hermétique de puissance 400 kVA – 30 kV/400 V

*Mémoire soutenu publiquement le 26 juin 2014 devant le jury composé de*

<b>Mr Mohammed Megherbi</b>		
Professeur	UMMTO	Président
<b>Mme Ferroudja Bitam-Megherbi</b>		
MCA	UMMTO	Rapporteur
<b>Mr Djamel Belkacemi</b>		
Chef Unité	Electro-Industries	Co-Rapporteur
<b>Mr Mohamed Imache</b>		
MAA	UMMTO	Examineur
<b>Mr M'hand Mekious</b>		
MAA	UMMTO	Examineur

# Remerciements

Je tiens à remercier ma promotrice, Mme F. Bitam-Megherbi, maître de conférences A au Département d'Electrotechnique de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou d'avoir bien voulu m'encadrer et pour son aide et les conseils qu'elle n'a cessé de me prodiguer pour l'aboutissement de ce travail. Qu'elle trouve ici ma profonde gratitude et toute ma reconnaissance.

Je tiens à remercier Monsieur Djamel Belkacemi, Responsable de l'Unité Transformateurs pour m'avoir permis de concrétiser mon projet de fin d'études au sein de l'Unité Transformateurs à l'Entreprise Electro-Industries.

Je tiens à remercier également, Melle A. Nait Djoudi, Ingénieur au bureau d'études à l'Unité Transformateurs d'Electro-Industries, pour son aide précieuse, ses conseils et ses remarques. Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude d'avoir bien voulu me diriger pendant toute la période de ce travail.

Mes remerciements vont également à l'ensemble du personnel d'Electro-Industries en général et de l'Unité Transformateurs en particulier.

J'adresse également mes remerciements aux membres du jury qui ont accepté de juger ce travail.

Que tous les enseignants qui ont contribué et participé à ma formation trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

# Dédicaces

Je dédie ce travail à :

- ⇒ Mes très chers parents qui m'ont toujours soutenu, encouragé et aidé.
- ⇒ Tous mes frères : Youyou et Noureddine.
- ⇒ Ma sœur Nassima ainsi que son mari Nabil et leur fille Louna.
- ⇒ Mes amis, Celia et tous ceux qui me sont chers.

*Diamel*

<b>Introduction générale</b> .....	1
------------------------------------	---

## **Chapitre I : Généralités sur les transformateurs de puissance**

I.1- Introduction.....	2
I.2- définition.....	2
I.3- Principe de fonctionnement .....	2
I.4- Constitution générale.....	2
I.4.1- Partie active.....	2
a- Circuit magnétique .....	2
b- Les enroulements.....	3
I.4.2- la partie constructive.....	4
a- La cuve.....	4
b- Le couvercle.....	5
c- Les traversées.....	5
d- Le conservateur d'huile .....	6
e- Le liquide diélectrique .....	6
I.5- Les couplages.....	6
I.5.1- Mode de couplage.....	6
I.5.2- Choix du couplage.....	8
I.6- Les différents types de transformateur.....	8
I.7- Rapport de transformation et indice horaire.....	9
I.7.1- Rapport de transformation.....	9
I.7.2- Indice horaire.....	9
I.8- Les pertes dans le transformateur.....	10
I.8.1- Pertes fer .....	10
a- Pertes par hystérésis.....	10
b- Pertes par courants de Foucault.....	11
I.8.2- Pertes Joule.....	11
I.8.3- Pertes supplémentaires.....	11
I.9- Protection des transformateurs.....	12
I.9.1- Relais Buchholz.....	12
I.9.2- Thermomètre .....	12
I.9.3- Les éclateurs.....	12
I.9.4- Renforcement de l'isolation .....	12
I.9.5- Assecheur d'air.....	13
I.9.6- Soupape de sécurité .....	13
I.10- Echauffement et refroidissement des transformateurs.....	13
I.10.1- Echauffement.....	13
I.10.2- Refroidissement .....	14
I.11- Régime de fonctionnement .....	14
I.11.1- Régime de surcharge.....	14
I.11.2- Régime déséquilibré .....	14
I.11.3- Régime transitoire.....	14

## **Chapitre II : Processus de fabrication d'un transformateur**

II.1- Introduction .....	15
II.2- Fabrication mécanique .....	15
La réalisation .....	15
a- La cuve.....	15
b- Le couvercle.....	18

c- Les tôles de serrage .....	19
d- Les tiges et les boulons de serrage.....	20
II.3- Fabrication électrique (bobinage) .....	20
II.3.1- Enroulement secondaire (BT) .....	20
II.3.2- Enroulement primaire HT .....	22
a- Enroulement en couche.....	22
b- Enroulement en galettes.....	23
II.4- Fabrication du circuit magnétique (Noyau) .....	24
II.5- Montage.....	27
II.5.1- Montage de la partie active .....	27
II.5.2- Branchement .....	28
a- Branchement de la basse tension BT : .....	28
b- Branchement de la haute tension HT.....	28
II.5.3- Soudage des connexions .....	28
II.6- Le séchage .....	28
II.7- Montage des accessoires sur le couvercle .....	29
II.8- Encuvage .....	29
II.9- Remplissage d'huile .....	30
II.10- Plate-forme d'essai.....	31
II.10.1- Essais individuels .....	31
II.10.2- Essai de type.....	33
II.10.3- Essais spéciaux.....	33
II.11- L'opération finale.....	33

## **Chapitre III : Calcul électromagnétique**

III.1-Introduction .....	34
III.2- Calcul préliminaire des dimensions principales .....	34
III.2.1- Puissance apparente par colonne.....	34
III.2.2- Tension dans les enroulements .....	34
a- Enroulement primaire .....	35
b- Enroulement secondaire.....	35
III.2.3 Courant dans les enroulements .....	35
a- Courant dans l'enroulement primaire.....	35
b- Courant dans l'enroulement secondaire .....	36
III.2.4 - Tension de court-circuit.....	36
III.2.5- Diamètre de la colonne.....	36
a- Epaisseur rapportée du canal de fuites.....	37
b- Facteur de sveltesse .....	38
c- Coefficient de Rogowski.....	38
d- Facteur d'utilisation de la section du fer .....	38
e- Induction magnétique de crête .....	39
f- Perméabilité magnétique du vide .....	39
g- Fréquence industrielle.....	39
III.2.6- La section de la colonne .....	40
III.2.7- Diamètre du canal de fuites.....	40
III.2.8- Hauteur des enroulements .....	41
III.3- calcul des enroulements .....	41
III.3.1- Tension d'une spire .....	41
1- Nombre de spires.....	41
2- Section des conducteurs secondaire.....	44
3- Calcul de la densité du courant du secondaire .....	45

4- Section des conducteurs du primaire .....	46
III.3.2- Hauteur des enroulements .....	47
III.3.2.1- Calcul de la hauteur magnétique pour l'enroulement secondaire.....	47
III.3.2.2- Calcul de la hauteur de la bobine secondaire .....	47
III.3.2.3- Calcul de l'épaisseur de la bobine secondaire.....	47
III.3.2.4- Hauteur du bobinage primaire.....	47
III.3.3- Vérification de la tension de court-circuit .....	48
III.3.4- Hauteur de montage .....	50
III.3.5- Dimensionnement radial des enroulements .....	50
III.3.5.1- Diamètre intérieur de la bobine basse tension.....	50
III.3.5.2- Diamètre extérieur de la bobine basse tension .....	50
III.3.5.3- Diamètre intérieur de la bobine haute tension.....	50
III.3.5.4- Diamètre extérieur de la bobine haute tension .....	50
III.4- Dimensionnement du circuit magnétique.....	51
III.4.1- Nombre et dimensions des gradins.....	51
III.4.2- Calcul du nombre de feuilles par gradin.....	51
III.4.3- Longueur entre axe des colonnes .....	52
III.4.4- Longueur de la fenêtre.....	53
III.4.5- Hauteur de la fenêtre .....	53
III.4.6- Hauteur du noyau .....	53
III.4.7- Longueur du noyau .....	53
III.4.8- Section de la culasse.....	54

## Chapitre 4 : Calcul des pertes et du rendement

IV.1. introduction .....	55
IV-2- Pertes fer (à vide) .....	55
IV-2-1 Pertes dans le noyau .....	55
IV.2.2. Pertes supplémentaires dans les coins .....	57
IV.2.3. Perte supplémentaire dans les culasses et les colonnes .....	57
IV.3- Pertes Joule .....	58
IV.3.1. Enroulement basse tension.....	58
a- Diamètre moyen de la spire.....	58
b- Longueur moyenne de la spire .....	58
c- Longueur totale d'un enroulement .....	58
d- Résistance de l'enroulement .....	58
e- Poids d'un enroulement .....	58
f- Pertes Joule côté basse tension.....	59
g- Pertes supplémentaires côté basse tension .....	59
h- Pertes totales en charge côté basse tension .....	62
IV-3-2. ENROULEMENT HAUTE TENSION.....	62
a- Diamètre moyen de la spire.....	62
b- Longueur moyenne de la spire .....	62
c- Longueur totale d'un enroulement .....	62
d- Résistance de l'enroulement .....	62
e- Poids d'un enroulement .....	63
f- Pertes Joule côté haute tension.....	63
g- Pertes supplémentaires côté haute tension .....	63
3- Pertes joule totales coté haute tension .....	64
IV.3.3. Pertes joules totales .....	64
IV.4. Calcul définitif de la tension de court-circuit .....	64

IV.5. Calcul du rendement .....	65
IV.6. Calcul de la chute de tension .....	66
IV.7. Calcul du courant à vide.....	67

## Chapitre 5 : Calcul thermique

VI.1. introduction .....	68
V.2- Echauffement du circuit magnétique .....	68
V.2.1- Echauffement maximal du circuit magnétique par rapport à la surface dans la direction longitudinale.....	68
V.2.2- Echauffement maximal du circuit magnétique par rapport à la surface dans la direction transversale.....	69
V.2.3- Différence de température entre la surface du circuit magnétique et l'huile dans la direction longitudinale.....	69
V.2.4- Différence de température entre la surface du circuit magnétique et l'huile dans la direction transversale.....	69
V.2.5- Echauffement maximal du circuit magnétique dans la direction longitudinale : .....	70
V.2.6- Echauffement maximal du circuit magnétique dans la direction transversale.....	70
V.3- Echauffement dans les enroulements .....	70
V.3.1- Echauffement moyen de l'enroulement secondaire par rapport à l'huile .....	70
a- Calcul de la surface intérieur de l'enroulement en contact avec l'huile .....	71
b- Calcul de la surface extérieure de l'enroulement en contact avec l'huile.....	71
c- Calcul de la conductivité résultante de l'enroulement.....	72
d- Calcul des résistances thermiques de l'isolation périphérique .....	72
e- Distance à laquelle la température est maximale.....	73
f- Calcul des flux thermiques.....	73
g- Calcul des résistances thermiques internes .....	74
h- Calcul de la température maximale de l'enroulement .....	74
i- Calcul des températures de l'enroulement .....	75
V.3.2- Echauffement moyen de l'enroulement primaire par rapport à l'huile .....	75
a- Calcul de la surface intérieure de l'enroulement en contact avec l'huile.....	75
b- Calcul de la surface extérieure de l'enroulement en contact avec l'huile.....	76
c- Calcul de la conductivité résultante de l'enroulement.....	76
d- Calcul des résistances thermiques de l'isolation périphérique .....	77
e- Distance à laquelle la température est maximale.....	77
f- Calcul des flux thermiques.....	77
g- Calcul des résistances internes .....	78
h- Calcul de la température maximale de l'enroulement .....	79
i- Calcul les températures de l'enroulement .....	79

## Chapitre 6 : Dimensionnement de la cuve

VI.1- Introduction.....	80
VI.2- Paramètres géométriques .....	80
VI.2.1- Longueur de la cuve.....	80
VI.1.2- Largeur de la cuve.....	80
VI.1.3- Hauteur de la cuve .....	80
VI.3- Dimensionnements des ondulations.....	81
VI.3.1- Calcul de l'élévation moyenne de température de l'huile .....	82
VI.3.2- Détermination du nombre d'ondulations.....	83
a- Côté largeur de la cuve .....	83

b- Côté longueur de la cuve.....	84
VI.4- Pertes dissipées par la cuve et le couvercle.....	84
VI.4.1- Pertes dissipées par la cuve .....	84
VI.4.2- Pertes dissipées par le couvercle.....	86
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>88</b>

## Cahier des charges

Puissance nominale .....	400 kVA
Tension primaire .....	30 kV
Tension secondaire .....	400 V
Perte à vide .....	1050 W
Perte de court-circuit .....	6210 W
Couplage .....	Dyn11
Tension de court-circuit .....	4,5 %
Température ambiante .....	40°C
Amplitude.....	≤ 1000 m

### **Encombrement :**

Longueur .....	1600 mm
Largeur .....	950 mm
Hauteur .....	1900 mm
Poids total .....	1560 KG

# INTRODUCTION GENERALE

L'énergie électrique produite par les centrales thermiques, hydrauliques et nucléaires, n'est pas utilisée dans les lieux de sa production. Il y a donc une nécessité de transporter cette énergie vers les endroits d'utilisation.

Le transformateur par ses différentes facettes d'utilisation, rend possible ce transport de manière très économique, et se trouve présent durant toutes les étapes de transport et l'utilisation de cette énergie. Les transformateurs sont donc des composants importants dans les réseaux électriques.

Les transformateurs sont des machines électriques statiques qui servent à transmettre la puissance du primaire au secondaire sans changer sa valeur c'est-à-dire que s'ils augmentent la tension, ils abaissent le courant et vice-versa.

La fabrication d'un transformateur est basée sur plusieurs conceptions qui dépendent du cahier des charges.

Ce travail est consacré à l'étude du dimensionnement et à la réalisation d'un transformateur triphasé à trois enroulements de puissance apparente 400 kVA et de tensions 30 kV/400 V, proposé par, l'entreprise Electro-Industries d'Azazga.

Notre mémoire s'articule autour des six chapitres suivants :

- Chapitre I généralités sur les transformateurs de puissance.
- Chapitre II processus de fabrication d'un transformateur.
- Chapitre III calcul électromagnétique.
- Chapitre IV calcul des pertes et du rendement.
- Chapitre V calcul thermique.
- Chapitre VI dimensionnement de la cuve.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

# CHAPITRE I

## Généralités sur les transformateurs de puissance

### **I.1- Introduction :**

Le transformateur est un appareil électrique très simple, mais il n'en constitue pas moins l'un des plus utiles. Le transformateur permet de modifier la tension et le courant dans un circuit. Grâce à lui, l'énergie électrique peut être transportée à grande distance de façon économique et distribuée dans les usines et les maisons.

### **I.2- Définition :**

Un transformateur de puissance est un composant électrique, essentiel dans l'exploitation des réseaux électriques. Sa définition selon la commission électrotechnique internationale est la suivante : « Appareil statique à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique, transforme un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et courant de valeurs généralement différentes, à la même fréquence, dans le but de transmettre de la puissance électrique ». Il peut être monophasé ou triphasé.

### **I.3- Principe de fonctionnement :**

Lorsque le primaire est alimenté par une source alternative, il circule dans le circuit magnétique un flux également alternatif dont l'amplitude dépend du nombre de spires du primaire et de la tension appliquée. Ce flux induit dans l'enroulement secondaire une tension proportionnelle à son nombre de spires. La fermeture du secondaire sur une charge provoque la circulation du courant secondaire.

### **I.4- Constitution générale :[2],[3],[7],[10]**

Le transformateur est constitué de deux parties : Partie active et partie constructive.

#### **I.4.1- Partie active :**

C'est la partie où est assurée la conversion d'énergie, elle comporte le circuit magnétique et les enroulements.

##### **a- Circuit magnétique :**

Le circuit magnétique est généralement constitué d'un empilage de tôles fines disposées dans un même plan, perpendiculairement et parallèlement les unes les autres, permettant ainsi d'obtenir une carcasse de la forme désirée.

La fonction principale du circuit magnétique est de canaliser le flux magnétique, mais elle sert aussi comme support aux enroulements. Ce circuit magnétique comporte trois colonnes réunies par deux culasses (figure I.1).

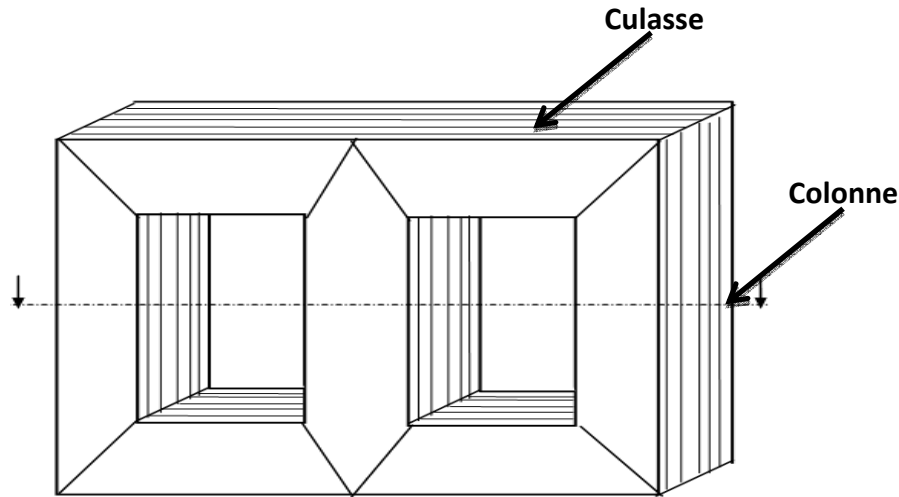


Figure I.1 : Circuit magnétique d'un transformateur triphasé.

Pour une meilleure efficacité, la tôle du circuit magnétique doit :

- Etre fabriquée en matériau à très haute perméabilité magnétique et être soumise à une induction proche de l'induction à saturation pour avoir une grande valeur du flux ;
- Avoir une épaisseur faible (0,3mm pour une fréquence  $f=50$  Hz) avec une isolation en Carlitte (matière à base de phosphate) pour diminuer les pertes par courants de Foucault ;
- Etre en grains orientés et laminées à froid avec un ajout de silicium pour réduire les pertes par hystérésis.

#### **b- Les enroulements :**

Les enroulements du transformateur sont les parties qui assurent, grâce aux phénomènes de l'induction électromagnétique, le transfert de puissance entre l'enroulement primaire et les enroulements secondaires (figure I.2).

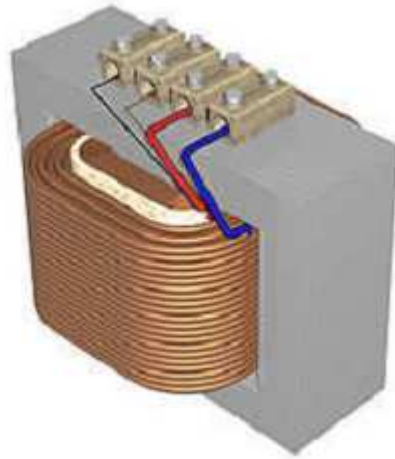


Figure I.2 : Enroulements dans un transformateur monophasé.

Pour des raisons économiques, les enroulements doivent satisfaire plusieurs conditions :

- Il faut diminuer les intervalles entre les enroulements pour diminuer le champ de dispersion magnétique, ce qui a pour effet de réduire la consommation de la puissance réactive.
- Les résistances des enroulements doivent être suffisamment faibles pour réduire les pertes d'énergie qui se dégagent sous forme calorifique.
- Les enroulements doivent résister à l'élévation de température, les court-circuits et les surtensions lors du fonctionnement du transformateur.

#### I.4.2- la partie constructive :

Elle est constituée des éléments suivants :

##### a- La cuve :

La cuve est un réservoir à huile pour les transformateurs émergés. Elle est généralement en tôle pliée pour former des ondulations qui favorisent l'échange thermique avec l'extérieur. La cuve joue un rôle d'isolation et de protection mécanique à la partie active, elle permet également l'évacuation de la chaleur (figure I.3).



Figure I.3 : Cuve d'un transformateur triphasé.

#### b- Le couvercle :

Le couvercle est un élément important de la cuve, il présente la partie supérieure du transformateur. Sa fonction principale est d'assurer la fermeture de la cuve, par ailleurs il sert de support aux accessoires suivants :

- Les traversées,
- Le relais Buchholz,
- L'indicateur de niveau d'huile,
- Le commutateur de réglage de tension,
- Capteur d'humidité (Silicagel),
- La poche de thermomètre pour la fixation d'un appareil de surveillance de la température.

#### c- Les traversées :

Les traversées ont pour rôle d'assurer à travers le couvercle la liaison électrique entre les extrémités des enroulements d'une part, et les lignes d'arrivée et de départ d'autre part. Le rôle des traversées est :

- La résistance aux efforts mécaniques.
- L'isolement de la connexion par rapport au couvercle.
- La bonne répartition du champ électrique.
- La fixation étanche et robuste sur le couvercle.

**d- Le conservateur d'huile :**

Il permet le remplissage complet de la cuve et réduit la surface de l'huile en contact avec l'air extérieur humide. Il sert aussi comme dispositif de contrôle de niveau d'huile suite à sa dilatation due aux différentes conditions climatiques.

**e- Le liquide diélectrique :**

C'est un mélange d'hydrocarbures provenant de la distillation du pétrole brut, après extraction des produits volatiles. On obtient ainsi l'huile pour transformateurs, qui est un liquide dont l'immersion de la partie active présente non seulement l'avantage d'une meilleure isolation, mais aussi celui de la facilité de refroidissement par circulation naturelle de l'huile.

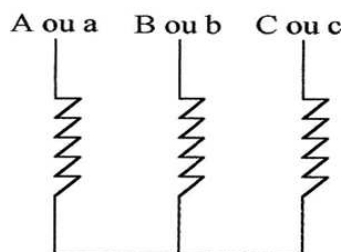
**I.5- Les couplages :[1],[3],[5]****I.5.1- Mode de couplage :**

Au primaire les enroulements peuvent être connectés soit en étoile (Y) soit en triangle (D).

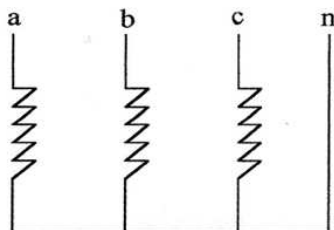
Au secondaire les enroulements peuvent être couplés de 3 manières différentes : étoile (y), triangle (d) et zigzag (z).

**- Couplage étoile :**

Il permet la sortie du point neutre, très utile en BT. Deux tensions sont disponibles : tension simple et tension composée. Il peut être avec ou sans neutre.

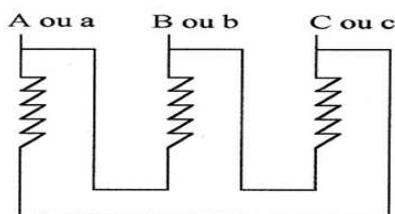
**➤ Sans neutre :**

- Avec neutre :



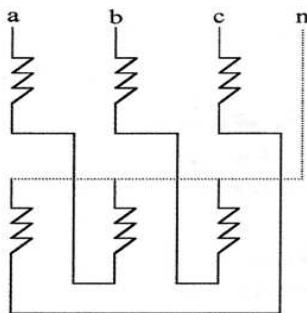
- Couplage triangle :

Il nécessite plus de spires par colonne que l'enroulement étoile, il n'y a pas de neutre possible.



- Couplage zig-zag :

On l'utilise lorsque la charge est déséquilibrée, afin de mieux répartir les déséquilibres sur les trois colonnes.



On obtient ainsi 6 couplages possibles entre primaire et secondaire :

- Y-y : étoile-étoile
- Y-d : étoile-triangle
- Y-z : étoile-zigzag
- D-y : triangle-étoile
- D-d : triangle-triangle
- D-z : triangle-zigzag.

### I.5.2- Choix du couplage :

On a intérêt à choisir:

- Un couplage étoile: aux très hautes tensions. Chaque enroulement supporte une tension :

$$V = U / \sqrt{3}$$

- Un couplage triangle : aux forts courants. L'intensité par enroulement est :

$$J = I / \sqrt{3}$$

Si on souhaite disposer de deux tensions : une tension basse pour l'éclairage et une tension élevée pour le chauffage d'un moteur, on adopte un couplage étoile au secondaire : cas du transformateur de distribution.

- Couplage étoile-étoile Yy : c'est un couplage utilisé dans les transformateurs abaisseurs de tension qui assurent la liaison entre réseau haute tension/moyenne tension.
- Couplage triangle-étoile Dy : c'est un couplage utilisé dans les transformateurs de distribution, utilisés comme élévateur de tension, à la sortie des centrales de distribution.
- Couplage étoile-zig-zag Yz : c'est un couplage utilisé dans les transformateurs de distribution pour compenser le déséquilibre.

### I.6- Les différents types de transformateur :[5]

Le domaine d'utilisation des transformateurs est très vaste. Selon le domaine d'utilisation, les appareils présenteront certaines différences dans les caractéristiques de construction. Le principe de fonctionnement des différents types de transformateurs est le même.

Il existe plusieurs types de transformateurs :

- Les transformateurs de puissance destinés au transport et la distribution de l'énergie électrique.
- L'autotransformateur destiné au réglage de la tension et à mettre en marche des moteurs alternatifs.
- Les transformateurs de mesure de tension et de courant.

- Les transformateurs de phase destinés à alimenter les installations à convertisseurs statiques (redresseurs...).
- Les transformateurs d'essais HT, THT.
- Les transformateurs de puissance spéciaux pour l'alimentation de fours, postes de soudage.
- Transformateur d'isolement qui crée une isolation galvanique entre son primaire et son secondaire et il sert à assurer la sécurité d'une installation.

Ces transformateurs ont le même nombre de spires au primaire et au secondaire.

## I.7- Rapport de transformation et indice horaire :

### I.7.1- Rapport de transformation :

Le rapport de transformation qui relie les grandeurs analogues du primaire et du secondaire ne dépend pas uniquement du nombre de spires mais aussi du mode de couplage des enroulements. Dès lors qu'on parle d'un transformateur triphasé, on se doit d'en préciser les différents couplages.

### I.7.2- Indice horaire :

L'indice horaire  $h$  est un nombre entier compris entre 0 et 11 qui traduit le déphasage  $\Theta$  entre deux tensions primaire et secondaire homologues avec :

$$h = \Theta / (\pi/6)$$

On peut déterminer  $\Theta$  :

- Soit à partir du schéma des connections.
- Soit pratiquement par des essais.

La figure I.4 donne un récapitulatif des indices horaires en fonction des différents couplages des enroulements.

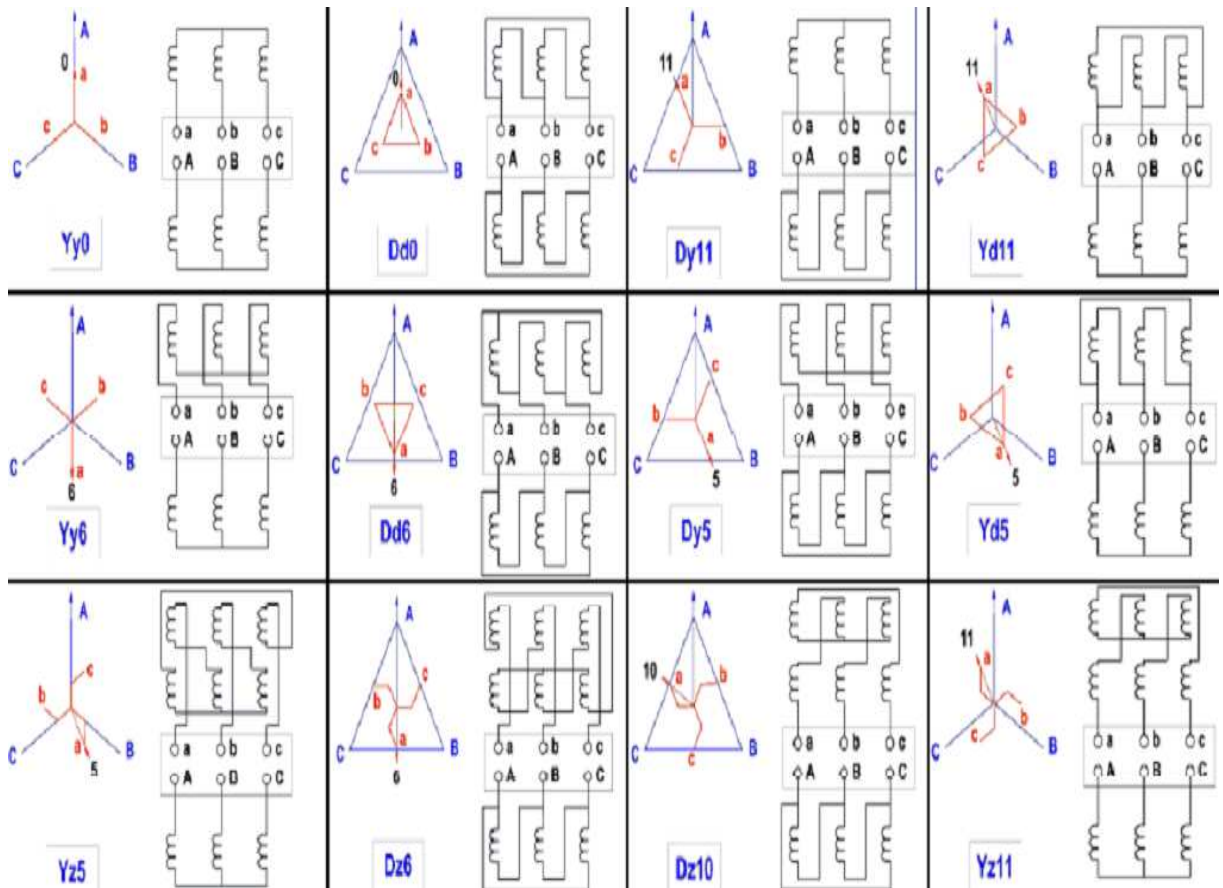


Figure I.4 : Relation entre indices horaires et couplages.

## I.8- Les pertes dans le transformateur :[2],[3]

### I.8.1- Pertes fer :

La variation périodique du flux magnétique provoque des pertes d'énergie dans les tôles du circuit magnétique par courants de Foucault et par hystérésis.

#### a- Pertes par hystérésis :

A chaque cycle complet d'hystérésis (figure I.5), il se produit une perte d'énergie. La perte est due au «frottement» des domaines magnétiques lorsqu'ils changent de sens. La quantité d'énergie dissipée par mètre cube est égale à la surface du cycle d'hystérésis.

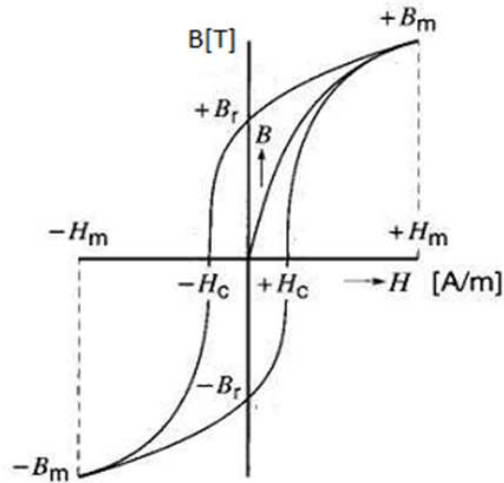


Figure I.5 : Cycle d'hystérésis

### b- Pertes par courants de Foucault :

Les courants de Foucault sont induits dans la masse du matériau ferromagnétique, lorsque ce matériau est soumis à un champ d'induction variable. Ces courants provoquent par effet Joule une dissipation d'énergie appelée « pertes classiques par courants induits (figure I.6) ».

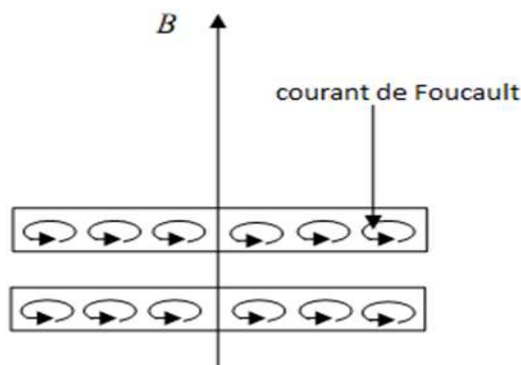


Figure I.6 : Schématisation des courants de Foucault.

### I.8.2- Pertes Joule :

Le passage du courant dans les enroulements provoque des pertes d'énergie proportionnelles à la résistivité et au volume du conducteur ainsi qu'au carré de la densité du courant. Le transformateur présente aussi des pertes dans les connexions et des pertes par effet pelliculaire.

### I.8.3- Pertes supplémentaires :

Ce sont les pertes dans les isolateurs ainsi que les pertes dans les différentes pièces de serrage et joints du circuit magnétique.

### I.9- Protection des transformateurs :

Le transformateur peut être confronté à de nombreux défauts pouvant affecter son fonctionnement et provoquer la détérioration et le vieillissement de ses constituants. Ainsi, des mesures de sécurité doivent être mises en place pour assurer le contrôle.

#### I.9.1- Relais Buchholz :

Un relais Buchholz (figure I.7) est un mécanisme se déclenchant quand une trop grande quantité de gaz est produite dans le transformateur, témoignant d'une décharge électrique dans l'huile. Il est placé entre la cuve d'huile et le conservateur, si le relais se déclenche le transformateur est déconnecté. Il ne se déclenche cependant, que quand le défaut est déjà assez prononcé.



Figure I.7. Relais Buchholz

#### I.9.2- Thermomètre :

Il sert à surveiller l'échauffement de l'huile de la cuve. Pour une température de l'huile qui atteint 75°C, il donne l'alarme et pour 80°C, on aura un déclenchement.

#### I.9.3- Les éclateurs :

Ils sont prévus pour protéger les traversées de transformateur, on les dispose entre la ligne du réseau et la terre pour écouler des surtensions vers la terre.

#### I.9.4- Renforcement de l'isolation :

En raison des surtensions résultant des différents phénomènes (atmosphérique, commutation) on laisse une distance entre les extrémités des enroulements et la culasse.

**I.9.5- Assecheur d'air :**

C'est un équipement qui absorbe l'humidité de l'air qui afflue dans le conservateur d'huile lors du refroidissement du transformateur. On évite ainsi dans une large mesure la diminution de la rigidité diélectrique de l'huile due à l'humidité de l'air ambiant et une formation de l'eau de condensation dans le conservateur d'huile. Donc l'assecheur d'air augmente la sécurité de fonctionnement du transformateur. Le déshydratant utilisé est du silicagel de couleur rose.

**I.9.6- Soupape de sécurité :**

Elle est sensible à une surpression subite dans la cuve de l'appareil et l'élimine aussitôt grâce à sa rapidité d'ouverture. Elle est placée sur le couvercle du transformateur. Lors d'un incident, la pression d'ouverture est atteinte. La soupape s'ouvre et le diélectrique est éjecté tant que la soupape est ouverte.

**I.10- Echauffement et refroidissement des transformateurs:****I.10.1- Echauffement :**

Pendant le fonctionnement d'un transformateur, un échauffement se produit et cela est dû aux pertes d'énergie électrique dans sa partie active à cause des :

- pertes par effet Joule.
- pertes par hystérésis.
- pertes par courants de Foucault.
- pertes entre contacts.

Cet échauffement engendre avec lui les effets suivants :

- pertes d'énergie.
- action de chaleur sur les métaux.
- action sur les isolants et vernis.

Pour éviter l'échauffement dans un transformateur, il faut le refroidir.

### I.10.2- Refroidissement :

Si l'on veut empêcher qu'un échauffement exagéré détériore les isolants d'un transformateur, il faut en assurer un refroidissement convenable. Pour cela, on utilise les types de refroidissement suivants :

- Refroidissement naturel dans l'air (AN).
- Refroidissement naturel dans l'huile (ON).
- Refroidissement naturel dans l'air par ventilation forcée (ONFA).
- Refroidissement artificiel dans l'huile (OFAF).

### I.11- Régime de fonctionnement :[7]

Les régimes de fonctionnement d'un transformateur sont :

#### I.11.1- Régime de surcharge :

Les transformateurs d'interconnexion des grands réseaux électriques doivent supporter les variations de la charge du réseau électrique. Ils sont soumis à des surcharges plus ou moins fortes pendant des durées plus ou moins longues.

#### I.11.2- Régime déséquilibré :

Le régime déséquilibré correspond à un incident sur l'une des trois phases du réseau. La composante homopolaire du courant dans les bobines devient importante entraînant un déséquilibre des ampères tours du circuit magnétique. Par conséquent une augmentation des pertes supplémentaires dans le cuivre et le fer provoque des échauffements locaux considérables.

#### I.11.3- Régime transitoire:

Les phénomènes transitoires dans le transformateur sont causés d'une part par les enclenchements et d'autre part par les court-circuits. Les enclenchements engendrent les surtensions et les court-circuits créent les surintensités qui engendrent les échauffements.

# CHAPITRE II

## Processus de fabrication d'un transformateur

### II.1- Introduction :[9],[11]

La fabrication des transformateurs se fait au département de production, sa mission est de fabriquer tous les constituants des parties des transformateurs.

Le service (département) englobe les trois ateliers qui forment la chaîne de production jusqu'au montage final.

Les ateliers de production sont définis comme suit :

- Atelier de bobinage.
- Atelier d'empilage du noyau.
- Atelier montage-encuvage.
- Atelier de mécanique.

Dans ce chapitre, nous allons décrire le processus de fabrication d'un transformateur de puissance de type hermétique. Pour cela, les étapes suivantes sont nécessaires.

### II.2- Fabrication mécanique :

Cette partie se déroule au niveau de l'atelier de fabrication mécanique où on fabrique tous les éléments qui constituent la partie constructive du transformateur, celle-ci est composée de :

- La cuve : composée de :
  - Parois ondulées à estampages permettant le mouvement des parois lors de la dilatation du diélectrique.
  - La partie inférieure.
  - Le cadre.
- Le couvercle.
- Les tôles de serrage.

#### La réalisation :

##### a- La cuve :

Pour la fabrication de cette partie, on passe par la réalisation des différents éléments qui constituent la cuve et pour cela on passe par les phases suivantes :

**Phase 1 : Réalisation des parois ondulées :**

Le matériau utilisé pour la fabrication est le ST 37.2, d'une épaisseur de 1.2 mm sous forme de rouleau de largeur variable suivant le type de transformateur.

La réalisation se fait comme suit :

- Emplacement du rouleau de tôle sur la machine qui réalise les ondulations (figure II.1) selon les dimensions qu'on va introduire à cette machine.
- Pliage de la tôle en forme d'ondulations avec un deux ou trois estampages selon la profondeur de l'ondulation.
- Découpage de la tôle. .
- Renforcement du soudage en utilisant des lames pour la facette externe.
- Contrôle des dimensions des parois et des baguettes d'écartement.

Il est à noter que toutes ces opérations sont réalisées avec des machines spéciales.



Figure II.1 : Machine permettant de réaliser les ondulations.

**Phase 2 : réalisation de la partie inférieure.**

Pour réaliser la partie inférieure du transformateur, les tôles sont découpées avec une machine cisaille suivant les dimensions désirées. La partie inférieure du transformateur est constituée de :

- La base : Avec une machine plieuse, la tôle subit une opération en largeur de 90° et de hauteur bien déterminée.
- Les parties latérales : l'emplacement de l'orifice de remplissage est poinçonné sur l'une des deux parties.

- Le support : après le découpage, la tôle est percée de quatre trous, deux sont réservés pour recevoir les galets. Après le perçage la tôle coupée sera envoyée vers la machine plieuse afin de leur donner la forme en « U ».

Après réalisation des constituants de la partie inférieure, on procède aux étapes suivantes :

- Contrôle des dimensions des pièces fabriquées.
- Montage de la partie inférieure : les étapes de montage sont :
  - L'assemblage des éléments de la partie inférieure par une opération de soudage.
  - Des boulons de guides sont soudés à l'intérieur de la partie inférieure pour l'immobilisation de la partie active du transformateur.
  - Un dispositif est fait pour permettre de recevoir le fil de la mise à la terre.

Une fois le montage est terminé la partie inférieure sera conduite au poste de sablage puis au dressage.

- Sablage : il consiste à enlever toute la rouille par injection sous pression d'un sable dit « grenaille d'acier » de type 0.9 à 1mm.
- Dressage : il s'agit d'éliminer toutes les bavures et redresser toute les déformations causées lors de la soudure ou du sablage.

### **Phase 3 : réalisation du cadre :**

Il se situe entre les parois ondulées et le couvercle. Le matériau utilisé est un acier doux qui arrive sous forme de profilés (cornière). Les profilés sont de longues barres de 5 mm d'épaisseur et de 45 mm de largeur, l'épaisseur et la largeur sont variables selon le type de transformateur. On découpe les barres qui constituent la largeur et la longueur du cadre puis on soude les extrémités. Après le soudage, le cadre passe au sablage et au dressage ensuite au perçage pour réaliser les trous de fixation sur la cuve. Enfin dans un poste de soudure, des baguettes d'acier de section carrée sont soudées au cadre elles servent de guidage pour le joints d'étanchéité.

### **Phase 4 : montage de la cuve :**

Le montage se fait suivant ces étapes :

- Rassemblement de tous les éléments qui constituent la cuve au poste de montage.

- Montage et fixation des éléments avec des pinces à étaux.
- Vérification de l'équerrage des parois ondulées.
- Contrôle du cadre (niveau).
- Application de la soudure.
- Contrôle de l'étanchéité de soudure avec une huile fluorescente dite « liquide de pénétration » pendant un temps déterminé.
- Détection des défauts à l'aide d'une lampe à rayon ultraviolet.
- Correction des défauts de soudure avec un chalumeau.
- Application de la peinture (couche d'antirouille).
- Après séchage, c'est le montage et fixation des galets sur le support.

#### **b- Le couvercle :**

Le matériau utilisé est de l'acier plat de 4 mm d'épaisseur, livré sous forme de paquets de tôles avec des dimensions différentes.

La réalisation du couvercle se fait selon les étapes suivantes :

- Découpage de la tôle sous forme de rectangle aux dimensions voulues.
- Poinçonnage des trous nécessaires sur le couvercle tels que :
  - Trois (3) trous pour l'emplacement des isolateurs HT.
  - Quatre (4) trous pour l'emplacement des traversées BT.
  - Deux (2) trous pour l'emplacement des poches thermomètre.
  - Un (1) trou pour l'emplacement de la manette de réglage.
  - (34) Trente-quatre trous ou plus pour la fixation du couvercle sur la cuve.
  - Deux (2) trous pour les éclisses (support).
- Soudage des pièces suivantes :
  - Les deux crochets de levage.
  - Les deux cornières d'appuis du couvercle.
  - Les trois brides HT pour permettre la fixation des isolateurs.
  - La prise de terre.
  - Les trois dispositifs pour permettre la fixation des éclateurs qui sont de côté HT.
  - Les deux dispositifs pour permettre la fixation du curseur de réglage de la tension.

- Le sablage et le dressage.
- La prescription des symboles et des chiffres sur le couvercle désignant les bornes HT (A, B, C), BT (a, b, c) et le neutre (n) ainsi que les symboles de la prise de terre et les trois positions du commutateur de réglage.
- Le contrôle de la qualité et des dimensions.

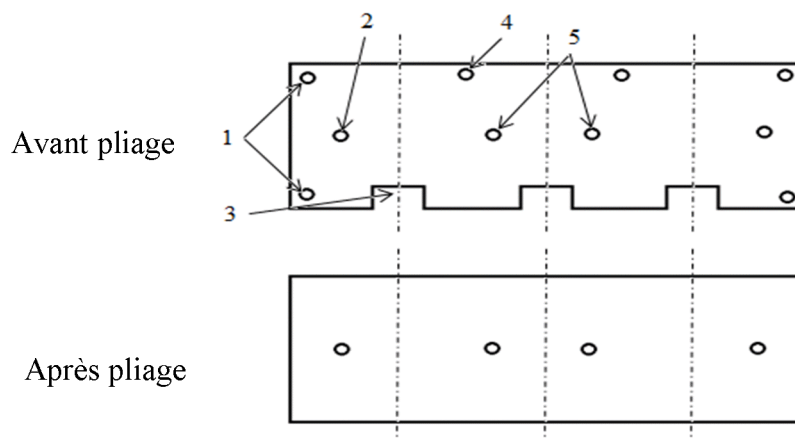
### c- Les tôles de serrage :

Selon les puissances, on distingue deux types d'utilisation :

Pour les puissances assez importantes, on utilise des ferrures en acier d'une épaisseur de 8 mm.

Pour les moyennes puissances, on utilise les tôles d'acier (figure II.2) qui se réalisent suivant ces étapes :

- Découper la tôle sur une longueur et une largeur calculées suivant le type du transformateur à réaliser.
- Percer la tôle comme indiqué ci-dessous :
  - Deux (2) trous pour le serrage du noyau.
  - Deux (2) trous pour serrer les tôles de serrage et fixer le support de couvercle.
  - Huit (8) trous pour la fixation de la partie active.
- Sablage et dressage.
- Le contrôle de qualité et les dimensions.



- (1) et (4) : tiges de serrage longitudinales pour la fixation appropriée à la partie active.
- (2) Trous des tiges de serrage transversales pour la fixation et le renforcement.
- (3) Fonte pour le passage des connexions des bobines HT et BT.
- (5) trous des tiges de serrage transversales pour la fixation du noyau.

Figure II.2 : Tôle de serrage

**d- Les tiges et les boulons de serrage :**

Elles sont au nombre de quatre (4) et sont présentées sous forme de barres cylindriques en acier A48. Elles servent à renforcer le serrage de la partie supérieure à la partie inférieure. Les deux (2) boulons de l'acier A48 servent à la suspension et serrage des tôles de serrages.

**II.3- Fabrication électrique (bobinage) :**

Il consiste en la fabrication des enroulements (bobines) (figure II.3). Ils sont réalisés à partir de conducteurs en cuivre de section circulaire ou rectangulaire.

Nous distinguons deux types d'enroulements :

- Enroulement primaire (HT).
- Enroulement secondaire (BT).



Figure II.3 : Enroulements d'un transformateur.

**II.3.1- Enroulement secondaire (BT) :**

L'enroulement est constitué de deux couches de fil conducteur en cuivre, de forme rectangulaire appelé méplat enroulé l'une sur l'autre isolées en papier sous forme de spirales.

La dimension du fil méplat est déterminée selon le type de transformateur.

La réalisation de la bobine BT passe par ces différentes phases :

**Phase 1 :** Mise en place du gabarit suivant la gamme d'usinage.

- Tube en papier bakélite.
- Rondelles latérales avec embouts.

**Phase 2 :** Phase d'enroulement.

- Choix de la section du fil méplat selon le type de transformateur.
- Choix de la forme d'enroulement, sut plan ou sur champ selon l'étude.
- Mise en place des cales de progression.
- Exécution du bobinage.
- Mise en place du canal de refroidissement.

**Phase 3 :** Renforcement de l'isolation.

- Renforcement de l'isolation avec du PSP (0,105) et (0,2)
- L'isolation finale se fait par un recouvrement à 50 % en PFG

**Phase 4 :** Séchage et pressage.

- La durée de séchage est de 12 heures.
- Mesure de tolérance (hauteur de la bobine).

**Phase 5 :** Contrôle de qualité.

Cette phase est réservée au contrôle des bobines fabriquées en ce qui concerne :

- Le nombre de spires.
- L'isolation.
- Les dimensions des fils.
- Le nombre de spires entre prises.

### II.3.2- Enroulement primaire HT :

Dans les bobines de haute tension HT le fil utilisé varie suivant la puissance du transformateur et le mode d'enroulement.

Nous distinguons deux types d'enroulements :

- Enroulement HT en couche.
- Enroulement HT en galette.

#### a- Enroulement en couche :

Il est constitué de plusieurs couches de fils conducteurs en cuivre de forme circulaire appelés fil vernis, enroulées les unes sur les autres sous forme de spirales, directement sur la bobine basse tension.

#### Réalisation :

**Phase 1 :** Mise en place du gabarit.

- Rondelles latérales.
- Bobine BT pour les petits transformateurs.

**Phase 2 :** Mise en place du canal de refroidissement.

- Recouvrir la bobine BT avec un canal de refroidissement.

**Phase 3 :** Phase d'enroulement et renforcement de l'isolation.

- Choix de la section du fil vernis selon le type de transformateur.
- Exécution du bobinage.
- Renforcement de l'isolation entre couches à l'aide du papier prespahn (PSP 0,2 mm).  
L'isolement se fait en couches.
- Mise en place du canal de refroidissement.
- Achèvement du bobinage pour dégager les trois prises respectivement sur les trois dernières couches.

L'isolation finale se fait par un recouvrement à 50% en PFG.

**Phase 4 :** contrôle de qualité.

Cette phase est pour but le contrôle des bobines fabriquées en ce qui concerne :

- Le nombre de spires.
- L'isolation.
- Les dimensions des fils et des bobines.
- Le nombre de spires entre prises.

**b- Enroulement en galettes :**

Il est constitué de plusieurs galettes superposées et alternées deux à deux de façon à répondre à certaines caractéristiques techniques.

La galette est constitué de plusieurs couches de fils conducteur en cuivre de forme circulaire isolé au papier appelé fils guipés.

**Réalisation :**

**Phase 1 :** Mise en place du gabarit suivant la gamme d'usinage.

**Phase 2 :** phase d'enroulement et renforcement de l'isolation. Choisir la section du fil guipé selon le type de transformateur.

- Exécution du bobinage de la galette.
- Renforcement de l'isolation avec du PSP (0,105 mm) et des rondelles en papier plissé.
- Mise en place du canal de refroidissement.
- Achèvement du bobinage de la galette.

**Phase 3 :** montage de l'enroulement en galette.

- Placement d'un tube en PSP (1,5 mm).
- Mise en série des galettes.
- Serrage de la bobine avec des rondelles en bois comprimé.

**Phase 4 :** séchage et pressage.

- Le temps du séchage est de 12 heures minimum.
- Mesure de tolérance pour la hauteur de la bobine.

**Phase 5 :** contrôle de qualité.

Cette phase est destinée au contrôle des bobines fabriquées en ce qui concerne :

- Le nombre de spires.
- L'isolation.
- Les dimensions des fils.
- Le nombre de spires entre prises.

#### **II.4- Fabrication du circuit magnétique (Noyau) :**

La fabrication du noyau se fait dans une partie de l'atelier de fabrication électrique, qui est équipée de plusieurs machines automatiques pour le découpage de la tôle.

Le matériau utilisé par Electro-Industries pour la fabrication des circuits magnétiques des transformateurs de puissance est la tôle magnétique VM97-30 d'acier doux. Cette tôle est livrée sous forme de rouleaux de 800 mm de largeur. Son extrémité est reliée à une chaîne de machines automatiques programmables qui exécutent toutes les opérations nécessaires pour le découpage de la tôle. Le circuit magnétique (noyau) comporte trois colonnes et deux culasses de même section. Nous distinguons alors :

- 02 colonnes latérales.
- 01 colonne centrale.
- 01 culasse supérieure.
- 01 culasse inférieure.

#### **Phases de réalisation :**

**Phase 1 :** Réalisation des culasses :

La machine effectue simultanément deux trous de 200 mm pour les transformateurs de puissance allant de 50 à 630 kVA et de 300 mm pour les puissances supérieures à 630 kVA qui sont poinçonnés à l'axe longitudinal de la culasse. On réalise ensuite une coupe ou un

dégagement sous forme de « V » formant un angle de  $90^\circ$  et une autre coupe de  $45^\circ$  sur chaque extrémité (figure II.4).

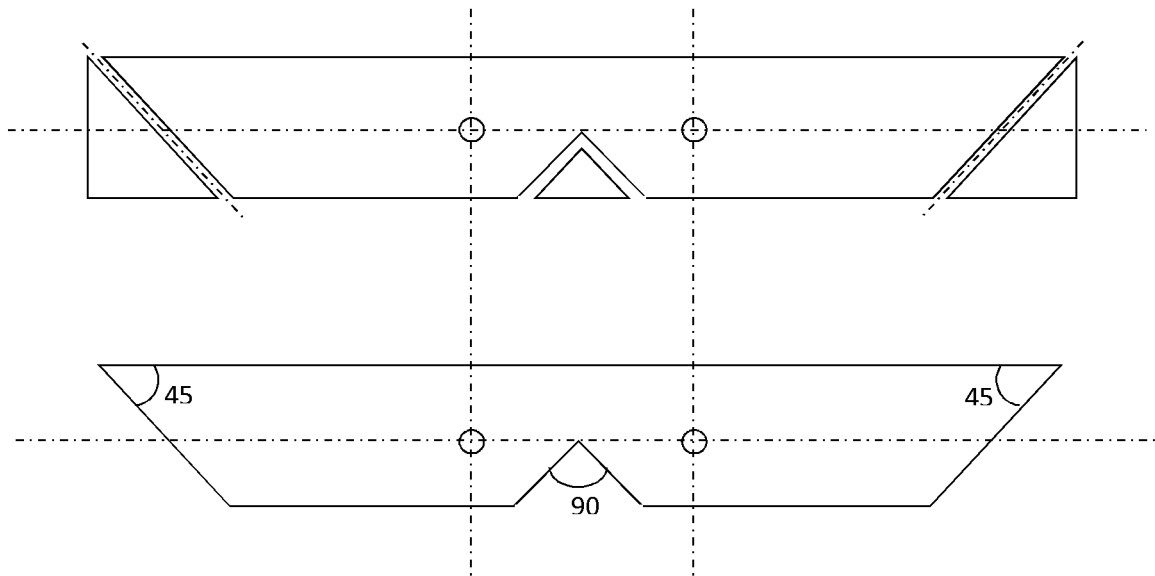


Figure II.4 : Mode de découpe des tôles du circuit magnétique.

### Phase 2 : Réalisation des colonnes latérales :

Elles sont réalisées alternativement par rapport à la culasse, la seule opération qu'elles subissent est la coupe sur chaque extrémité d'un angle de  $45^\circ$  (figure II.5).

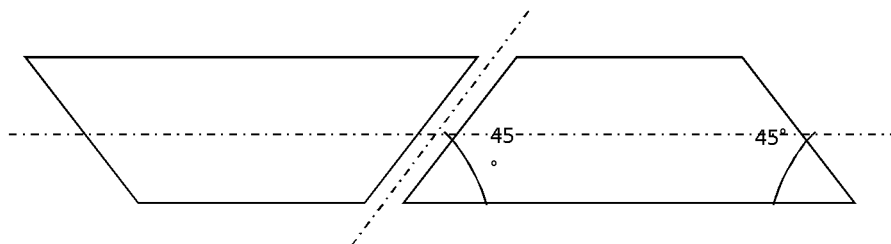


Figure II.5 : Mode de découpe des colonnes latérales du circuit magnétique.

### Phase 3 : Réalisation de la colonne centrale :

Elle est réalisée de la même façon que les colonnes latérales mais leurs extrémités subissent deux coupes de  $45^\circ$  de chaque côté, ce qui donne une coupe en flèche d'un angle de  $90^\circ$  (figure II.6).



Figure II.6 : Découpe de la colonne centrale du circuit magnétique.

**Phase 4 :** contrôle dimensionnel.

Dans cette phase il y aura un contrôle des dimensions des culasses et des colonnes une (1) fois par heure, par un technicien.

**Phase 5 :** montage du noyau.

- Mise en place de gabarit d'empilage : il est réalisé sur une table spécialement aménagée pour ce genre de travail appelée table d'empilage. Elle est munie d'un dispositif qui sert à maintenir la table de serrage et de deux tiges pour centrer les tôles de la culasse inférieures à cette dernière.
- On place d'abord sur la table d'empilage une tôle de serrage puis on introduit les tiges de centrage. Une plaque en papier de 2 mm d'épaisseur est placée sur la tôle de serrage.
- Empilage du noyau : il s'agit d'empiler les tôles de la culasse inférieure deux par deux sur la tôle de serrage, puis enchevêtrer les tôles de la colonne entre celles de la culasse.
- Serrage et renforcement de l'isolation : les deux tôles de serrage sont serrées à l'aide de quatre gougeons avec un isolement qui se fait sur la partie qui traverse la culasse par des tubes en PSP. Les écrous de ces gougeons sont isolés par rapport aux tôles de serrage grâce à des rondelles en PSP.
- Mise en place du châssis : le châssis est placé sur la tôle de serrage et pour éviter le déplacement des tôles et toute sollicitation mécanique, elles sont serrées à l'aide d'un fil plat qui s'enlèvera lors du montage des bobines.
- La culasse supérieure sera montée tôle par tôle une fois que les bobines sont montées sur le noyau.

### II.5- Montage :

Cette opération vise l'assemblage du transformateur de puissance et a pour rôle de finaliser le produit fabriqué. Une fois les parties constructives sont achevées, elles passent à l'atelier du montage ou sont réunis tous les organes magnétiques, électriques et mécaniques constituant le transformateur.

Dans l'atelier de montage on réalise le montage des bobines sur le noyau puis en refermant ce dernier par la culasse supérieure. On fixe les tôles de serrage et on réalise la connexion des bobines puis on passe à la partie d'encuvage. Le montage/encuvage obéit au protocole suivant :

#### II.5.1- Montage de la partie active :

Le montage des enroulements consiste à fixer les bobines BT et HT sur les trois colonnes du noyau comme suit :

- Montage des bobines BT et HT après la mise en place des cales d'appuis sur la culasse inférieure. Ces cales sont réalisées à l'atelier de boiserie.
- Introduction des écrans en papier, en bakélite ou en PSP dans le noyau.
- Etablissement des baguettes d'écartement en bois entre les colonnes et les bobines BT pour éviter les vibrations.
- Etablissement des parois en papier presspahn entre les bobines.
- Renforcement de l'isolation entre les extrémités supérieures des bobines et la culasse inférieure avec du papier PSP.
- Mise en place des cales d'appuis du côté supérieur des bobines.
- Montage de la culasse supérieure tôle par tôle.
- Vissage des tiges de serrage.
- Fixation des pattes de serrage.
- Fermeture de la culasse supérieure avec la fixation des deux tôles de serrage supérieures.
- Contrôle de la partie active après le montage.

**II.5.2- Branchement :**

Le cahier des charges proposé par Electro-Industries impose le couplage Dyn 11 avec neutre.

**a- Branchement de la basse tension BT :**

Le Branchement de la basse tension s'effectue par la fixation de gabarit indiquant les dimensions des connexions à une hauteur bien déterminée. Les entrées BT sont fixées à l'aide d'un dispositif en bois isolant qui est fixé à la tôle de serrage par des boulons. La connexion est assurée par des baguettes en cuivre de section rectangulaire soudées aux entrées des bobines BT et à l'aide des pattes en cuivre soudées aux sorties des bobines BT. A ces pattes percées sont fixées les bornes des bobines BT.

**b- Branchement de la haute tension HT :**

L'enroulement primaire est couplé en triangle comme suit :

- Fixation du gabarit HT à une hauteur bien déterminée.
- Fixation du commutateur de réglage sur le gabarit. Les prises doivent être connectées au plot du commutateur.

**II.5.3- Soudage des connexions**

Les connexions sont isolées par des tubes en papier PSP et fixées sur les baguettes de fixation avec des colliers en plastique.

Une fois le branchement terminé, la phase du contrôle de branchement est réalisée pour l'isolation et les connexions des bobines.

**II.6- Le séchage :**

Après l'assemblage des pièces formant la partie active, cette dernière est soumise à un séchage obligatoire dans un four à une température de 120°C pendant une durée de sept (7) heures (figure II.7).



Figure II.7. Séchage des parties active du transformateur.

### II.7- Montage des accessoires sur le couvercle :

On fixe sur le couvercle les isolateurs et les traversées qui assurent la liaison entre les enroulements et la ligne extérieure. Les isolateurs des bornes BT sont isolés par rapport au couvercle à l'aide d'une rondelle en caoutchouc assurant l'étanchéité, par contre ceux de la tension HT sont bridés sur le couvercle.

### II.8- Encuvage :

L'encuvage passe par les différentes étapes suivantes ( figure II.8):

- Montage du couvercle sur la partie active à l'aide de deux écrous qui se vissent sur les tiges filetées des pattes de suspension.
- Fixation des bornes des enroulements aux isolateurs.
- Montage du commutateur sur le couvercle avec deux boulons.
- Montage du relais Buchholz suivant la commande.
- Introduction de la partie active dans la cuve.
- Assemblage du couvercle au cadre de la cuve (avec des boulons) avec étanchéité à l'aide d'un joint en néoprène avec limiteur de serrage.



Figure II.8. Encuvage des parties active du transformateur.

### II.9- Remplissage d'huile :

Cette opération consiste à remplir le transformateur dans un four de remplissage sous vide pendant une durée de trois (3) heures, à la température ambiante, d'une huile minérale. Le remplissage se fait du bas vers le haut pour éliminer l'air qui se trouve à l'intérieur de la cuve (figure II.9).

L'huile utilisée est de type minérale isolante et a les propriétés suivantes :

- Extrême résistance au vieillissement.
- Coefficient de pertes diélectriques très faible.
- Absence d'acidification.
- Absence de modification de surface du cuivre.
- Point de congélation à  $-45^{\circ}\text{C}$ .



Figure II.9. Remplissage du transformateur

### II.10- Plate-forme d'essai :

La plate-forme d'essais est un dispositif de contrôle technique où le transformateur subit l'ultime contrôle avant son expédition. Elle est constituée d'un tableau de commande permettant de réaliser les essais exigés par la norme de construction.

Nous avons trois (3) types d'essais classés comme suit :

- Essais individuels.
- Essais de type.
- Essais spéciaux.

#### II.10.1- Essais individuels :

Ces essais sont effectués sur chaque transformateur, ils ont pour but de vérifier que les conditions de son fonctionnement sont conformes à celles du transformateur ayant subi les essais de type.

Les essais individuels sont réalisés de la manière suivante :

- Essai diélectrique ou d'isolation :

Cet essai a pour rôle de vérifier la tenue de l'isolation entre auxiliaires (enroulements, spires, connexions de prises, bornes des enroulements) d'une part et entre les auxiliaires et la terre d'autre part.

➤ Essai à vide :

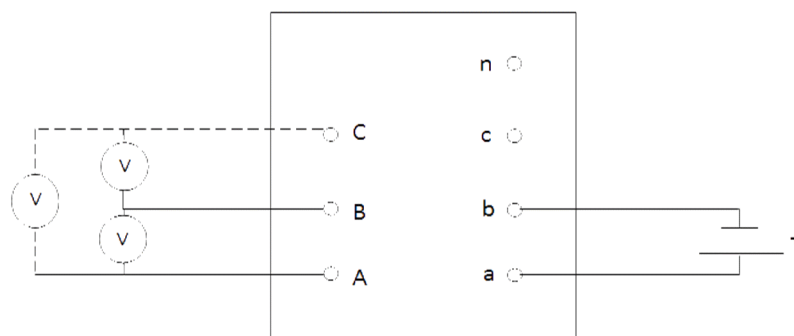
Il nous permet de mesurer le rapport de transformation, les pertes à vide et le courant à vide.

- On mesure les pertes à vide par la méthode des deux wattmètres.
- Le rapport de transformation est mesuré sur chaque prise, et pour les trois positions du commutateur de réglage de la tension. On vérifie pour chaque position le rapport de transformation pour chaque phase.
- Le courant à vide égal à la somme des courants de phase divisé par le nombre de phases.

➤ Vérification de l'indice horaire ;

On alimente le secondaire avec une source continue, en reliant la borne (a) à la polarité positive, la borne (b) à la polarité négative et on note le sens de la déviation de l'aiguille du voltmètre.

Chaque signe des impulsions observées entre les bornes A et B, A et C, B et C nous donne la valeur de l'indice horaire.



➤ Mesure de la résistance des enroulements :

Cet essai nous permet de déterminer les pertes Joule avec la connaissance de la résistance des enroulements.

➤ Essai en court-circuit :

Cet essai nous permet de mesurer la tension de court-circuit et les pertes de court-circuit.

### II.10.2- Essai de type :

L'essai de type est réalisé sur un transformateur pris comme échantillon sur un lot du même type. Il nous permet de mesurer les échauffements de l'huile et des enroulements ainsi que la tenue au choc de foudre.

### II.10.3- Essais spéciaux :

Ce type d'essais nous permettra entre autres de mesurer le bruit et la résistance du neutre par rapport à la masse.

### II.11- L'opération finale :

Si les essais effectués sur le transformateur à la plate-forme d'essais sont avérés favorables, celui-ci passe à la chambre de peinture.

Après la sortie du transformateur de la chambre de peinture, celui-ci subit le dernier contrôle puis on procède au montage des accessoires. A la fin on place la plaque signalétique et ensuite on livre le produit fini à l'expédition.

# CHAPITRE III

## Calcul électromagnétique

**III.1-Introduction :**

Le calcul électromagnétique d'un transformateur nécessite en premier lieu un calcul préliminaire qui consiste en la détermination des dimensions principales à partir du cahier des charges. En second lieu, un calcul définitif est effectué. Ce calcul permet le dimensionnement des enroulements ainsi que l'établissement des caractéristiques géométriques et électromagnétiques.

**III.2- Calcul préliminaire des dimensions principales :[3],[6],[4]**

Les dimensions principales d'un transformateur sont :

- Le diamètre de la colonne D.
- Le diamètre du canal de fuites  $D_{12}$ .
- La hauteur des bobines.

**III.2.1- Puissance apparente par colonne  $S_c$  :**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$S_c = \frac{S_n}{n_c} \quad [kVA] \quad (III.1)$$

$S_n$  : Puissance apparente nominale.

$n_c$  : Nombre de colonnes égal à 3.

Donc :

$$S_c = \frac{400 \times 10^3}{3} = 133.33 \text{ kVA}$$

$$S_c = 133.33 \text{ kVA}$$

**III.2.2- Tension dans les enroulements :**

La tension de phase dépend du mode de couplage de l'enroulement. Le couplage dans notre transformateur est  $Dy_{n11}$  ( figure III.1 ).

Avec :

D : l'enroulement primaire est couplé en triangle.

Y : l'enroulement secondaire est couplé en étoile.

n : désigne le neutre.

11 : indique que la tension secondaire est en retard de  $\frac{11.\pi}{6}$  par rapport à la tension primaire.

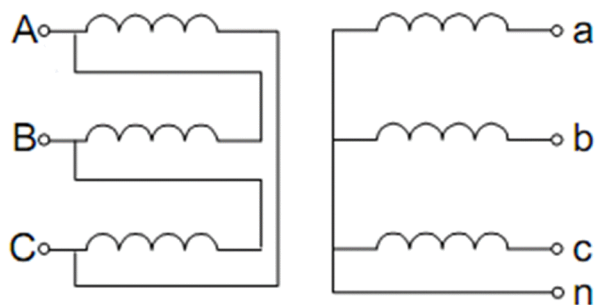


Figure III.1 : branchement des enroulements

**a- Enroulement primaire (HT) :**

La tension de phase de l'enroulement primaire est :

$$U_{ph1} = U_{1n} \quad [\text{kV}] \quad \text{III.2}$$

Avec  $U_{1n}$  : tension composée primaire nominale.

$$U_{ph1} = 30 \text{ kV}$$

**b- Enroulement secondaire (BT) :**

$$U_{ph2} = \frac{U_{n2}}{\sqrt{3}} \quad [\text{V}] \quad \text{III.3}$$

$$U_{ph2} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230.94 \text{ V}$$

$$U_{ph2} = 230.94 \text{ V}$$

**III.2.3 Courant dans les enroulements :**

Le courant nominal dépend du mode de couplage, de la puissance nominale et de la tension appliquée aux bornes de chaque enroulement.

**a- Courant dans l'enroulement primaire :**

$$I_{ph1} = \frac{S_n}{U_{1n} \cdot \sqrt{3}} \quad [\text{A}] \quad \text{III.4}$$

$$I_{ph1} = \frac{400 \cdot 10^3}{30 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}}$$

$$I_{ph1} = 7.69 \text{ A}$$

## b- Courant dans l'enroulement secondaire :

$$I_{ph2} = \frac{S_n}{U_{2n} \cdot \sqrt{3}} \quad \text{III.5}$$

$$I_{ph2} = \frac{400 \cdot 10^3}{400 \cdot \sqrt{3}}$$

$$I_{ph2} = 577.35 \text{ A}$$

III.2.4 - Tension de court-circuit  $U_{cc}$  :

La tension de court-circuit est la tension avec laquelle on alimente le primaire, de sorte que le secondaire en court-circuit débite un courant d'intensité égale au courant nominal. Elle s'exprime en pourcentage (%) de la tension nominale  $U_{n1}$ .

Elle est donnée par la relation suivante :

$$U_{cc} = \sqrt{U_{cca}^2 + U_{ccr}^2} \quad \text{III.6}$$

$U_{cca}$  : Composante active, elle est donnée par la formule suivante :

$$U_{cca} = \frac{P_{cc}}{S_n} \times 100 \text{ [%]}. \quad \text{III.7}$$

Avec  $P_{cc}$  : pertes en charge.

$$U_{cca} = \frac{6210}{400 \times 10^3} \times 100 \text{ [%]}.$$

$$U_{cca} = 1.55 \text{ \%}.$$

$U_{ccr}$  : Composante réactive, elle est donnée par la formule suivante :

$$U_{ccr} = \sqrt{U_{cc}^2 - U_{cca}^2} \text{ [%]} \quad \text{III.8}$$

$$U_{ccr} = \sqrt{4.5^2 - 1.55^2}$$

$$U_{ccr} = 4.22 \text{ \%}$$

III.2.5- Diamètre de la colonne  $D$  :

Le diamètre est donné par la formule suivante :

$$D = \sqrt[4]{\frac{16 \cdot \mu_0 \cdot a_r \cdot \beta \cdot K_R \cdot S_c}{\pi^3 \cdot f \cdot K_u^2 \cdot B_c^2 \cdot U_{cc}}} \text{ [cm]} \quad \text{III.9}$$

Les paramètres  $S_c$  et  $U_{cc}$  étant définis, il nous reste à définir les paramètres suivants :  $a_r$ ,  $K_r$ ,  $K_u$ ,  $B_c$  et  $\beta$ .

**a- Epaisseur rapportée du canal de fuites  $a_r$  :**

Pour les enroulements concentriques, il est donné par la formule suivante :

$$a_r = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \quad [\text{cm}] \quad \text{III.10}$$

$a_{12}$  : Largeur du canal de fuites principales, elle est choisie en fonction de la tension la plus élevée du transformateur. Sa valeur est donnée par le tableau III.1.

$a_1$  : Epaisseur de l'enroulement primaire (HT).

$a_2$  : Epaisseur de l'enroulement secondaire (BT).

Tableau III.1. Largeur du canal de fuites principales en fonction de la tension nominale

$U_n$ [kV]	3 à 8	10	15	20	35	60	170	220
$a_{12}$ [cm]	0.6 à 1.5	0.8 à 1.2	1 à 1.5	1.2 à 1.8	1.5 à 2.5	-	6 à 8	13 à 22

Pour un calcul préliminaire, on prend une largeur du canal de fuites qui vaut :  $a_{12}=1.5$  cm.

Le terme  $\frac{a_1 + a_2}{3}$  est fonction de la puissance apparente par colonne du transformateur, il est donné par la relation suivante :

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = K \cdot \sqrt[4]{S_c} \quad [\text{cm}] \quad \text{III.11}$$

K : facteur dépendant de la puissance apparente par colonne et de la tension la plus grande du transformateur (voir tableau III.2).

Tableau III.2. Valeurs du facteur K en fonction de la tension et de la puissance apparente par colonne.

$S_c$ [kVA]	<100	100 à 500	750 à 5600	7500 à 31500
$U_n$ [kV]	$\leq 10$	10 à 35	10 à 35	10 à 35
K	0.6 à 0.8	0.4 à 0.6	0.4 à 0.5	0.44 à 0.46

Pour un calcul préliminaire on prend pour K la valeur suivante :

K = 0.5.

Donc :

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = 0,5 \cdot \sqrt[4]{133,33}$$

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = 1,7 \text{ cm}$$

$$a_r = 1,5 + 1,7$$

$$a_r = 3,2 \text{ cm}$$

**b- Facteur de sveltesse  $\beta$  :**

Il a une influence directe sur les dimensions du transformateur et il nous renseigne sur la réalisation et l'exploitation du transformateur. Il est donné par la relation suivante :

$$\beta = \frac{\pi + D_{12}}{h_B} \quad \text{III.12}$$

$D_{12}$  : Diamètre du canal de fuites.

$h_B$  : Hauteur de la bobine.

D'après la relation précédente, on remarque que le facteur de sveltesse est fonction de deux grandeurs géométriques du transformateur.

La valeur de  $\beta$  dépend de la puissance apparente par colonne, de la tension la plus grande et du type de matériau utilisé pour le bobinage. Sa valeur donnée par le tableau III.3.

Tableau III.3. Valeurs du facteur de sveltesse en fonction de la puissance apparente et de la tension

$S_c$ [kVA]	3 à 2000		2000 à 3000	
$U_n$ [kV]	6 à 10	35		110
$\beta$ cuivre	3.4 à 1.75	3 à 1.8	1.8 à 1.3	2 à 1.5
$\beta$ aluminium	1.8 à 1.15		1.77 à 1.49	

D'après le cahier des charges, le matériau qui nous intéresse est le cuivre.

Pour un calcul préliminaire, on prend  $\beta = 2.3$ .

**c- Coefficient de Rogowski  $K_R$  :**

C'est le coefficient de réduction de l'enroulement à la longueur théorique des lignes de champ de dispersion. Il est donné par la relation suivante :

$$K_R = 1 - \frac{a_1 + a_2 + 2a_{12}}{2\pi \times h_B} \quad \text{III.13}$$

La valeur de  $K_R$  est comprise entre 0.90 et 0.97.

Pour le calcul préliminaire, on prend une valeur de  $K_R = 0.96$

**d- Facteur d'utilisation de la section du fer  $K_U$  :**

Il est donné par la relation suivante :

$$K_u = K_g \times K_r \quad \text{III.14}$$

$K_r$  : Coefficient de remplissage, il dépend de l'épaisseur des tôles utilisée et de l'isolation. Il varie entre 0.93 et 0.98.

$K_g$  : Coefficient géométrique qui tient compte du nombre de gradins constituant la colonne et de la puissance apparente par colonne  $S_c$ . Sa valeur est donnée par le tableau III.4.

Tableau III.4. Valeurs du coefficient géométrique en fonction de la puissance apparente et du nombre de gradins

$S_c$ [kVA]	<5	5 à 15	15 à 45	45 à 500
N gradins	2	4	5	6
$K_g$	0.786	0.866	0.91	0.93

Pour un calcul préliminaire, on prend :

$$K_g = 0.93 \quad \text{et} \quad K_r = 0.95.$$

$$K_u = 0.93 \times 0.95.$$

$$K_u = 0.8835.$$

#### e- Induction magnétique de crête $B_c$ :

Elle est choisie en fonction de la puissance apparente du transformateur et du type des tôles utilisées. Pour les tôles d'épaisseur 0.27 et 0.3 mm laminées à froid,  $B_c$  varie entre 1.75 T et 2 T.

Pour un calcul préliminaire on prend  $B_c = 1.79$  T.

#### f- Perméabilité magnétique du vide $\mu_0$ :

Sa valeur est égale à :

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m} \quad \text{III.15}$$

#### g- Fréquence industrielle $f$ :

Sa valeur est fixée par le réseau avec  $f = 50$  Hz

➤ La valeur du diamètre de la colonne est :

$$D = \sqrt[4]{\frac{16 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 3,2 \cdot 10^{-2} \times 2,3 \times 0,96 \times 133,33 \times 10^3}{\pi^3 \times 50 \times 0,8835^2 \times 1,79^2 \times 0,045}}$$

$$D = 18.1 \text{ cm}$$

**III.2.6- La section de la colonne  $S_{fer}$  :**

Elle est donnée par la formule :

$$S_{fer} = \frac{\pi \times D^2}{4} \times K_u \text{ cm}^2 \quad \text{III.16}$$

$$S_{fer} = \frac{\pi \times 18,1^2}{4} \times 0,8835$$

$$S_{fer} = 227,3 \text{ cm}^2$$

**III.2.7- Diamètre du canal de fuites  $D_{12}$  :**

$$D_{12} = D + (2 \times a_{20}) + (2 \times a_2) + a_{12} \text{ [cm]} \quad \text{III.17}$$

$a_{20}$  : Distance entre la colonne et l'enroulement basse tension, elle donnée par le tableau III.5.

Tableau III.5. Valeurs de la distance entre la colonne et l'enroulement basse tension en fonction de la tension nominale secondaire.

$U_{n2}$ [KV]	$\leq 1$	3	6	10	15	20	35
$a_{20}$ [cm]	0.5	1.2	1.2 à 1.5	1.8	1.8 à 2	2.1 à 2.5	3

Dans notre cas on prend  $a_{20} = 0,5 \text{ cm}$

$a_2$  : Épaisseur de l'enroulement basse tension, il est donné par la formule suivante :

$$a_2 = K_{a2} \times \sqrt[4]{S_c} \text{ [cm]}. \quad \text{III.18}$$

$K_{a2}$  : Coefficient dépendant de la tension nominale.

- $K_{a2} = 0,55$  pour  $U_n \leq 35 \text{ kV}$ .
- $K_{a2} = 0,45$  pour  $U_n \leq 110 \text{ kV}$ .

On prend donc :

$K_{a2} = 0,55$  et  $a_{12} = 1,5 \text{ cm}$ .

$$a_2 = 0,55 \times \sqrt[4]{133,33} \text{ [cm]}.$$

$$a_2 = 1,7 \text{ cm}$$

$$D_{12} = 17,6 + (2 \times 0,5) + (2 \times 1,7) + 2,1 \text{ [cm]}$$

$$D_{12} = 23,5 \text{ cm}$$

**III.2.8- Hauteur des enroulements  $h_B$  :**

On donne aux bobines basse et haute tension une même hauteur et cela, d'une part pour éviter toute la contrainte que peuvent créer les forces électrodynamiques et d'autre part pour faciliter le calage des bobines contre la culasse.

La hauteur des enroulements est donnée par la formule suivante :

$$h_B = \frac{\pi \times D_{12}}{\beta} [cm] \quad \text{III.19}$$

$$h_B = \frac{\pi \times 23.5}{2.3}$$

$$h_B = 32.08 \text{ cm}$$

**III.3- calcul des enroulements : :[3],[6],[4]****III.3.1- Tension d'une spire  $U_{sp}$  :**

La valeur de la tension d'une spire est la même pour les deux enroulements car le flux qui circule dans le noyau est le même. Elle est donnée par la formule suivante :

$$U_{sp} = \sqrt{2} \times \pi \times f \times B_c \times S_{fer} [V] \quad \text{III.20}$$

$$U_{sp} = \sqrt{2} \times \pi \times 50 \times 1.79 \times 227.3 \times 10^{-4} [V]$$

$$U_{sp} = 9.03 \text{ V}$$

**1- Nombre de spires :****a- Enroulement basse tension  $N_2$  :**

Il est donné par la relation suivante :

$$N_2 = \frac{U_{ph2}}{U_{sp}} \quad \text{III.21}$$

$$N_2 = \frac{400/\sqrt{3}}{9.03}$$

$$N_2 = 25.57$$

$$N_2 = 26 \text{ pires}$$

**b- Recalcul de la tension d'une spire :**

$$U_{sp} = \frac{U_{ph2}}{N_2} \quad \text{III.22}$$

$$U_{sp} = \frac{230.94}{26}$$

$$U_{sp} = 8.88 \text{ V}$$

*c- Enroulement haute tension  $N_1$  :*

On a: 
$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{ph1}}{U_{ph2}} \quad \text{III.23}$$

$$N_1 = N_2 \times \frac{U_{ph1}}{U_{ph2}}$$

$$N_1 = 26 \times \frac{30 \times 10^3}{230.94}$$

$$N_1 = 3377 \text{ spires}$$

*d- Recalcul de l'induction de crête :*

$$B_c = \frac{U_{sp}}{\sqrt{2} \times \pi \times f \times S_{fer}} \quad [\text{T}] \quad \text{III.24}$$

$$B_c = \frac{8.88}{\sqrt{2} \times \pi \times 50 \times 227.3 \times 10^{-4}}$$

$$B_c = 1.76 \text{ T}$$

*e- Calcul du nombre de spires de réglage :*

La tension de réglage est de  $\pm 2 \times 2.5 \%$ .

Le réglage de la tension à  $\pm 5\%$  de la valeur nominale nous donne :

➤ Le nombre de spires nominal est :

$$N_{1nom} = 3377 \text{ spires}$$

➤ Le nombre de spires maximal est :

$$N_{1max} = N_{1nom} + 5\% N_{1nom} \quad \text{III.25}$$

$$N_{1max} = 3377 + (0.05 \times 3377).$$

$$N_{1max} = 3546 \text{ spires.}$$

➤ Le nombre de spires minimal est :

$$N_{1min} = N_{1nom} - (5\% N_{1nom}) \quad \text{III.26}$$

$$N_{1min} = 3377 - (0.05 \times 3377)$$

$$N_{1min} = 3208 \text{ spires.}$$

- Le nombre de spires de réglage est :

$$N_r = N_{1nom} - N_{1min} \quad \text{III.27}$$

$$N_r = 3377 - 3208$$

$$N_r = 167 \text{ spires.}$$

Le réglage de la tension à  $\pm 2.5\%$  de la valeur nominale nous donne :

- Le nombre de spires maximal est :

$$N_{1max} = N_{1nom} + 2.5\% N_{1nom}$$

$$N_{1max} = 3377 + (0.025 \times 3377).$$

$$N_{1max} = 3461 \text{ spires.}$$

- Le nombre de spires minimal est :

$$N_{1min} = N_{1nom} - (2.5\% N_{1nom})$$

$$N_{1min} = 3377 - (0.025 \times 3377)$$

$$N_{1min} = 3293 \text{ spires.}$$

- Le nombre de spires de réglage est :

$$N_r = N_{1nom} - N_{1min}$$

$$N_r = 3377 - 3293$$

$$N_r = 84 \text{ spires.}$$

Le nombre de spires de réglage pour la tension de réglage à 0% est le nombre de spires nominal.

#### *f- Calcul de la densité moyenne du courant :*

Elle est donnée par la formule suivante :

$$J_m = \frac{1}{2 \times \pi \times \rho_T \times K_{pcc}} \times \frac{P_{cc}}{S_n} \times \frac{U_{SP}}{D_{12}} \quad [A/mm^2] \quad \text{III.28}$$

Avec :

$$\rho_T = \rho_{20} [1 + \alpha(T - 20)] \quad \text{III.29}$$

$\rho_T$  : Résistance du cuivre à la température considéré  $[\frac{\Omega m}{mm^2}]$

$\rho_{20}$  : Résistance du cuivre à 20°C, elle est égale à 0.0178  $[\Omega m]$

$\alpha$  : Coefficient de température égal à  $0.00381 [^{\circ}\text{C}^{-1}]$ .

T : Température de fonctionnement égal à  $75^{\circ}\text{C}$ .

$$\rho_T = 0.0178[1 + 0.00381(75 - 20)]$$

$$\rho_T = \mathbf{0.0215 \Omega \cdot m/mm^2}$$

$P_{cc}$  : Pertes de court-circuit en [W].

$K_{pcc}$  : Facteur tenant compte des pertes supplémentaire en court-circuit, il est fonction de la puissance apparente du transformateur (voir tableau III.6)

Tableau III.6. Facteur régissant les pertes supplémentaires  
en fonction de la puissance apparente

$S_n$ [kVA]	30	180	600	1000	1600	2000	2500	4000
$K_{pcc}$	1.02	1.025	1.05	1.06	1.07	1.075	1.08	1.09

Pour une puissance de 400 kVA, on prend  $K_{pcc} = 1.04$

$$J_m = \frac{1}{2 \times \pi \times 0.0215 \times 1.04} \times \frac{6210}{400 \times 10^3} \times \frac{8,88}{23.5 \times 10^{-2}}$$

$$J_m = \mathbf{4.17 A/mm^2}$$

La valeur de la densité du courant pour les conducteurs en cuivre varie entre  $1.5$  à  $4.5 A/mm^2$ . Donc cette valeur est acceptable.

## 2- Section des conducteurs secondaire :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$S_2 = \frac{I_{ph2}}{J_m} [mm^2] \quad \text{III.30}$$

$I_{ph2}$  : Courant nominal qui traverse l'enroulement secondaire.

$$S_2 = \frac{577.35}{4.17} [mm^2]$$

$$S_2 = \mathbf{138.48 mm^2}$$

La section  $S_2$  est grande, on prend deux conducteurs de fil méplat qu'on place en parallèle et la somme de leurs sections est égale à celle calculée.

On choisit une section normalisée à partir du tableau III.7, soit 2 fils de section normalisée de  $69.2 mm^2$ .

$$S_{2n} = 2 \times 69.2 = 138.4 mm^2$$

Les dimensions de fil méplat de cuivre sont :  $a=6.3 mm$ ,  $b=11.2 mm$ .

a : épaisseur du conducteur en [mm].

b : largeur du conducteur en [mm].

Tableau III.7. Sections normalisées en fonction de la largeur l'épaisseur du fil

a \ b	4.5	5.0	5.6	6.3	7.1	8.0	9.0	10.0	11.2	11.8	12.5	13.2	14.0	15.0	16.0
1.0			5.4	6.1	6.9										
1.12			6.1	6.8	7.7										
1.25	5.4	6.0	6.8	7.7	8.7										
1.4	6.1	6.8	7.6	8.6	9.7	11.0									
1.6	7.0	7.8	8.7	9.9	11.2	12.6									
1.8	7.7	8.6	9.7	11.0	12.4	14.0	15.8								
2.0	8.6	9.6	10.8	12.2	13.8	15.6	17.6								
2.24	9.7	10.8	12.2	13.8	15.5	17.6	19.8	22.0							
2.5		12.0	13.5	15.2	17.2	19.4	22.0	24.4							
2.8		13.4	15.1	17.1	19.3	21.8	24.6	27.4	30.8						
3.15		15.2	17.1	19.3	21.8	24.6	27.8	31.0	34.7	36.6	38.8				
3.55			19.3	21.8	24.7	27.8	31.4	35.0	39.2	41.3	43.8	46.3	49.2		
4.0				24.3	27.5	31.1	35.1	39.1	43.9	46.3	49.1	51.9	55.1	59.1	63.1
4.5					31.1	35.1	39.6	44.1	49.5	52.2	55.4	58.5	62.1	66.6	71.1
5.0					34.6	39.1	44.1	49.1	55.1	58.1	61.1	65.1	69.1	74.1	79.1
5.6						43.9	49.5	55.1	61.9	65.2	69.1	73.1	77.5	83.1	88.7
6.3						49.1	55.5	61.7	69.2	73.0	77.4	81.8	86.9	93.2	99.5
7.1							62.6	69.7	78.2	82.4	85.4	92.4	98.1	105.0	112.0
8.0									88.3	93.1	98.7	104.0	111.0	119.0	127.0
8.5											105.0		118.0		135.0

Au-dessous du trait fort : prévoir une isolation de 0.5 mm.

Au-dessus du trait fort : prévoir une isolation de 0.45 mm.

### 3- Calcul de la densité du courant du secondaire :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$J_2 = \frac{I_{ph2}}{S_{2n}}$$

III.31

$$J_2 = \frac{577.35}{138.48}$$

$$J_2 = 4.17 \text{ A/mm}^2$$

Erreur commise sur la densité du courant :

$$\frac{\Delta J_{m2}}{J_m} = \frac{|J_m - J_2|}{J_2} \times 100 \quad \text{III.32}$$

$$\frac{\Delta J_{m2}}{J_m} = \frac{|4.17 - 4.17|}{4.17} \times 100$$

$$\frac{\Delta J_{m2}}{J_m} = 0 \%$$

Cette erreur est inférieure à la valeur admissible qui est de 5%.

#### 4- Section des conducteurs du primaire :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$S_1 = \frac{I_{ph1}}{\sqrt{3} \times J_m} \text{ mm}^2 \quad \text{III.33}$$

$I_{ph1}$  : Courant primaire.

$$S_1 = \frac{7,69}{\sqrt{3} \times 4,17}$$

$$S_1 = 1.06 \text{ mm}^2$$

Comme la section  $S_1$  est inférieure à  $5 \text{ mm}^2$ , on choisit un conducteur en fil rond vernis.

Le diamètre nu correspondant à  $S_1$  est :

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \times S_1}{\pi}} \quad \text{III.34}$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \times 1.05}{\pi}}$$

$$d_1 = 1.16 \text{ mm}$$

D'après l'Electro-Industries, le diamètre normalisé est  $d_{1n} = 1.32 \text{ mm}$  (diamètre nu). Le diamètre avec isolation est  $d_{1iso} = 1.422 \text{ mm}$ .

La section normalisée sera donc :

$$S_{1n} = \frac{\pi \times 1.32^2}{4}$$

$$S_{1n} = 1.36 \text{ mm}^2$$

Correction de la densité du courant primaire :

III.35

$$J_1 = \frac{I_{ph1}}{\sqrt{3} \times S_{1n}}$$

$$J_1 = \frac{7.69}{\sqrt{3} \times 1.36}$$

$$J_1 = 3.26 \text{ A/mm}^2$$

La valeur trouvée est inférieure à la valeur moyenne de la densité du courant, elle est donc acceptable.

### III.3.2- Hauteur des enroulements :

#### III.3.2.1- Calcul de la hauteur magnétique pour l'enroulement secondaire :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$h_{mag2} = N_2 \times (b + I_{so}) \quad \text{III.36}$$

$$h_{mag2} = 26 \times (11.2 + 0.5)$$

$$h_{mag2} = 304.2 \text{ mm}$$

#### III.3.2.2- Calcul de la hauteur de la bobine secondaire :

$$h_{B2} = (N_2 + 1) \times (b + I_{so}) \quad \text{III.37}$$

$$h_{B2} = (26 + 1) \times (11.2 + 0.5)$$

$$h_{B2} = 316 \text{ mm}$$

#### III.3.2.3- Calcul de l'épaisseur de la bobine secondaire :

$$a_2 = 2a' + c \quad \text{III.38}$$

$a'$  : épaisseur du conducteur méplat avec isolation.

$c$  : épaisseur du canal de refroidissement, on le prend égal à 4 mm.

$$a' = a + I_{so} \quad \text{III.39}$$

$$a' = 5.6 + 0.5$$

$$a' = 6.6 \text{ mm}$$

$$a_2 = 2 \times 6.6 + 4$$

$$a_2 = 17.2 \text{ mm}$$

#### III.3.2.4- Hauteur du bobinage primaire :

La hauteur magnétique est égale à la hauteur de la bobine primaire. Elle doit être au maximum égale à la hauteur magnétique de l'enroulement secondaire, la différence entre elles varie entre 0 à 16 mm. On considère dans cette étude une différence de 10 mm.

$$h_{m1} = h_{B1} = h_{B2} - 10$$

$$h_{m1} = h_{B1} = 316 - 10$$

$$h_{m1} = h_{B1} = 306 \text{ mm}$$

- Calcul du nombre de spires par couche de l'enroulement primaire :

$$N_{s1/c} = \frac{h_{B1}}{d_{iso}} \quad \text{III.41}$$

$$N_{s1/c} = \frac{316.1}{1.422} = 222.29$$

$$N_{s1/c} = 222 \text{ spires}$$

- Nombre de couches pour l'enroulement primaire :

$$N_c = \frac{N_{1max}}{N_{s1/c}} \quad \text{III.42}$$

$$N_c = \frac{3410}{222} = 15.36$$

$$N_c = 16 \text{ couches}$$

Épaisseur de l'enroulement primaire :

$$a_1 = (N_c \times d_{iso}) + (N_c - 1) \times \sigma + c \quad \text{III.43}$$

$c$  : épaisseur du canal de refroidissement égale à 8 mm, 2 baguettes de 4 mm.

$\sigma$  : Épaisseur du papier isolant entre couches égale à 0.2 mm.

$$a_1 = (16 \times 1.422) + (16 - 1) \times 0.2 + 8$$

$$a_1 = 33.75 \text{ mm}$$

### III.3.3- Vérification de la tension de court-circuit :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$U_{ccr}(\%) = \frac{2\pi \times f \times \mu_0 \times a_r \times N_2 \times K_R \times I_{ph2} \times \beta}{U_{2n}} \times 100 \quad \text{III.44}$$

- Correction du coefficient de sveltesse :

III.45

$$\beta = \frac{\pi \times D_{12}}{h_{B2}}$$

Recalcul du diamètre de fuite :

III.46

$$D_{12} = D + (2 \times a_{20}) + (2 \times a_2) + a_{12} \text{ [cm]}$$

$$D_{12} = 18.1 + (2 \times 0.5) + (2 \times 1.72) + 1.5$$

$$\mathbf{D_{12} = 24.03 \text{ cm}}$$

$$\beta = \frac{\pi \times 24.03}{34.6}$$

$$\mathbf{\beta = 2.18}$$

$$\frac{\Delta\beta}{\beta} = \frac{|2.18 - 2.3|}{2.18} \times 100$$

$$\frac{\Delta\beta}{\beta} = \mathbf{5.5 \%}$$

Erreur relative admissible inférieure à 20%.

➤ Epaisseur rapportée du canal de fuites :

$$a_r = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}$$

III.47

$$a_r = 2.1 + \frac{33.75 + 17.2}{3}$$

$$\mathbf{a_r = 31.98 \text{ mm}}$$

➤ Valeur définitive du facteur de Rogowski :

$$K_R = 1 - \frac{a_1 + a_2 + 2a_{12}}{2\pi \times h_B}$$

III.48

$$K_R = 1 - \frac{33.75 + 17.2 + (2 \times 15)}{2\pi \times 332.1}$$

$$\mathbf{K_R = 0.96}$$

Alors :

$$U_{ccr}(\%) = \frac{2\pi \times 50 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 31.98 \times 10^{-3} \times 26^2 \times 0.96 \times 577.35 \times 2.18}{230.94} \times 100$$

$$\mathbf{U_{ccr} = 4.45 \%}$$

Donc :

$$U'_{cc} = \sqrt{U_{cca}^2 + U_{ccr}^2} \quad \text{III.49}$$

$$U'_{cc} = \sqrt{1.55^2 + 4.45^2}$$

$$U'_{cc} = 4.71 \%$$

### III.3.4- Hauteur de montage :

La hauteur de montage des bobines primaires et secondaires sont égales :

$$h_m = h_{B1} + 2d \quad \text{III.50}$$

D : épaisseur des cales d'appui égal à 20 mm.

$$h_m = 306 + (2 \times 20)$$

$$h_m = 346 \text{ mm}$$

### III.3.5- Dimensionnement radial des enroulements :

#### III.3.5.1- Diamètre intérieur de la bobine basse tension :

$$D_{i2} = D + (2 \times a_{20}) \text{ [mm]} \quad \text{III.51}$$

$$D_{i2} = 181 + (2 \times 0.5)$$

$$D_{i2} = 182 \text{ mm}$$

#### III.3.5.2- Diamètre extérieur de la bobine basse tension :

$$D_{ex2} = D_{i2} + (2 \times a_2) \text{ [mm]} \quad \text{III.52}$$

$$D_{ex2} = 182 + (2 \times 17.2)$$

$$D_{ex2} = 216.4 \text{ mm}$$

#### III.3.5.3- Diamètre intérieur de la bobine haute tension :

$$D_{i1} = D_{ex2} + (2 \times a_{12}) \text{ [mm]} \quad \text{III.53}$$

$$D_{i1} = 216.4 + (2 \times 15)$$

$$D_{i1} = 246.4 \text{ mm}$$

#### III.3.5.4- Diamètre extérieur de la bobine haute tension :

$$D_{ex1} = D_{i1} + (2 \times a_1) \text{ [mm]} \quad \text{III.54}$$

$$D_{ex1} = 246.4 + (2 \times 30)$$

$$D_{ex1} = 306.4 \text{ mm}$$

### III.4- Dimensionnement du circuit magnétique : [3],[6],[4]

La forme de la section de la colonne et de la culasse est circulaire, c'est pour cela que nous avons eu recours à un empilage de tôles sous forme de gradins.

#### III.4.1- Nombre et dimensions des gradins :

D'après le tableau III.4, le nombre des gradins nécessaire pour une puissance  $S_c=133.33$  kVA est égal à six (6). Suivant le diamètre de la colonne et le nombre des gradins, la norme de conception consultée à Electro-Industries donne pour chaque gradin les largeurs suivantes :

$$B_{s1} = 180 \text{ mm}$$

$$B_{s2} = 160 \text{ mm}$$

$$B_{s3} = 140 \text{ mm}$$

$$B_{s4} = 120 \text{ mm}$$

$$B_{s5} = 100 \text{ mm}$$

$$B_{s6} = 60 \text{ mm}$$

Pour déterminer les hauteurs des gradins on doit appliquer le théorème de Pythagore.

$$H_{si} = \sqrt{D^2 - B_{si}^2} \text{ [mm]} \quad \text{III.55}$$

$$H_{s1} = 19 \text{ mm}$$

$$H_{s2} = 84.6 \text{ mm}$$

$$H_{s3} = 114.7 \text{ mm}$$

$$H_{s4} = 135.5 \text{ mm}$$

$$H_{s5} = 150.8 \text{ mm}$$

$$H_{s6} = 170.7 \text{ mm}$$

#### III.4.2- Calcul du nombre de feuilles par gradin :

Il est donné par la formule suivante :

$$N_{fi} = 2 \times \left( \frac{h_{si}}{e_{tm}} \right) \quad \text{III.56}$$

$e_{tm}$  : épaisseur de la tôle magnétique égale à 0.3 mm.

$$N_{f1} = 127$$

$$N_{f2} = 564$$

$$N_{f3} = 764$$

$$N_{f4} = 903$$

$$N_{f5} = 1005$$

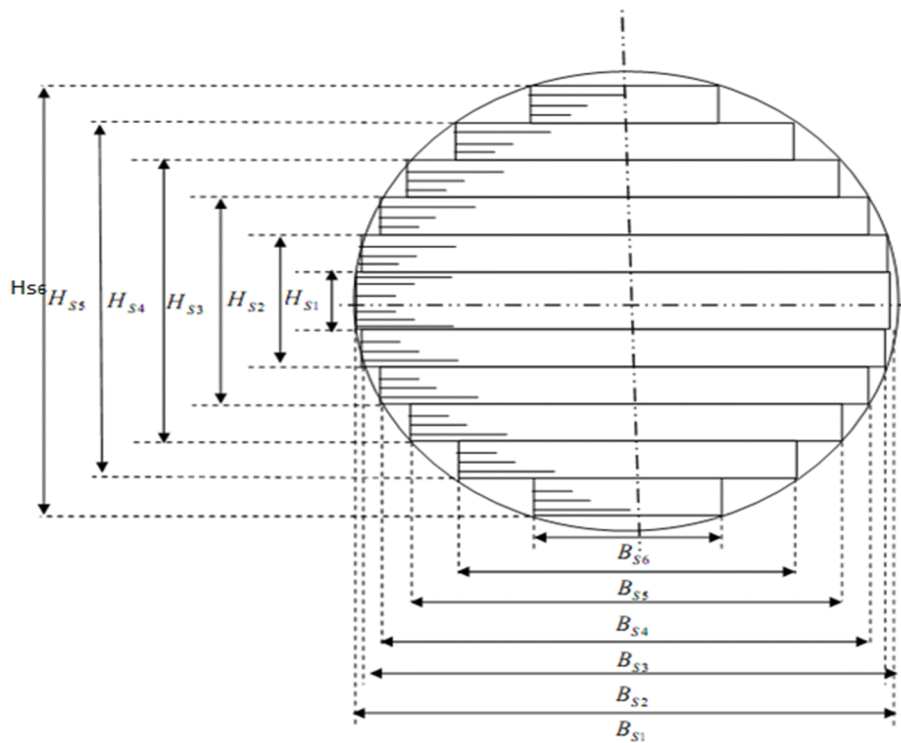
$$N_{f6} = 1138$$

Le nombre total de feuilles dans le transformateur :

$$N_{fi\ tot} = \Sigma N_{fi} \quad \text{III.57}$$

$$N_{fi\ tot} = 1138$$

La figure ci-dessous montre le nombre et la hauteur des gradins.



**III.4.3- Longueur entre axe des colonnes  $E_c$ :**

$$E_c = D_{ex1} + a_{11} \text{ [mm]} \quad \text{III.58}$$

$a_{11}$  : Distance latérale entre deux enroulements HT voisins, sa valeur est donnée par le tableau III.8. La valeur prise par le constructeur est de 17 mm.

Figure III.8. Distances latérales entre deux enroulements HT voisins

$U_n$ [kV]	$a_{11}$ [mm]
10	$\geq 8$
20	$\geq 11$
30	$\geq 17$

$$E_c = 306 + 15 = 321 \text{ mm}$$

$$E_c = 321 \text{ mm}$$

#### III.4.4- Longueur de la fenêtre $L_f$ :

$$L_f = E_c - B_{s1} \text{ [mm]} \quad \text{III.59}$$

$$L_f = 321 - 180$$

$$L_f = 141 \text{ mm}$$

#### III.4.5- Hauteur de la fenêtre $H_c$ :

$$H_c = H_m + 30 \text{ [mm]} \quad \text{III.60}$$

$$H_c = 346 + 30$$

$$H_c = 376 \text{ mm}$$

#### III.4.6- Hauteur du noyau $H_n$ :

$$H_n = H_c + (2 \times B_{s1}) \text{ [mm]} \quad \text{III.61}$$

$$H_n = 376 + (2 \times 180)$$

$$H_n = 736 \text{ mm}$$

**III.4.7- Longueur du noyau  $L_n$ :**

$$L_n = (2 \times E_c) + B_{s1} \text{ [mm]} \quad \text{III.62}$$

$$L_n = (2 \times 321) + 180$$

$$L_n = \mathbf{822 \text{ mm}}$$

**III.4.8- Section de la culasse  $S_{cu}$ :**

Pour diminuer la dissymétrie magnétique due à la distribution linéaire des colonnes, la culasse doit avoir une section supérieure de 0.15 à 20 % à celle de la colonne.

$$S_{cu} = S_{fer} + (0.15 \times S_{fer}) \quad \text{III.63}$$

$$S_{cu} = 224.9 + (0.15 \times 224.9)$$

$$S_{cu} = \mathbf{258.6 \text{ cm}^2}$$

# CHAPITRE IV

## Calcul des pertes et du rendement

**IV.1. introduction :**

Le transformateur est une machine statique contenant des tôles magnétiques et du cuivre. Il est le siège de pertes dans le fer et de pertes dans le cuivre.

**IV-2- Pertes fer (à vide)  $P_0$  : [3],[6],[9]**

Elles sont constantes. Elles dépendent du poids du noyau et de la valeur de l'induction magnétique maximale. Elles sont données par la relation suivante :

$$P_0 = P'_0 + P_{s1} + P_{s2} \quad \text{IV.1}$$

$P'_0$  : Pertes dans le noyau.

$P_{s1}$  : Pertes supplémentaires dans les coins.

$P_{s2}$  : Pertes supplémentaires dans les colonnes et culasses.

**IV-2-1 Pertes dans le noyau  $P'_0$  :**

Elles sont données par l'expression

$$P'_0 = \delta_{1.5} \times K_{BP} \times G_n \quad \text{IV.2}$$

$\delta_{1.5} = 0,95 \text{ W/kg}$  : Pertes spécifiques pour une induction de 1.5 T

$K_{BP}$  : Coefficient correcteur des pertes spécifiques pour une induction différente de 1.5 T, sa valeur est donnée par le tableau IV.1:

Tableau IV.1. Valeurs du coefficient correcteur des pertes spécifiques pour une induction maximale différente de 1.5 T.

B[T]	$K_{BP}$
$0.5 \leq B_c \leq 1.1$	$0.413 B_c$
$1.1 < B_c \leq 1.5$	$0.0758 e^{1.72B_c}$
$1.5 \leq B_c \leq 1.8$	$0.0536 e^{1.95B_c}$
$1.8 < B_c \leq 2$	$0.01126 e^{2.817B_c}$

Pour une induction maximale de  $1.5 \leq B_c \leq 1.8$ , nous aurons  $K_{BP} = 0.0536 e^{B_c}$

$$K_{BP} = 0.0536 e^{1.95 \times 1,76}$$

$$\mathbf{K_{BP} = 1.65}$$

Soit  $G_n$  le poids total du noyau. Ce poids est réparti selon le schéma de la figure IV.1.

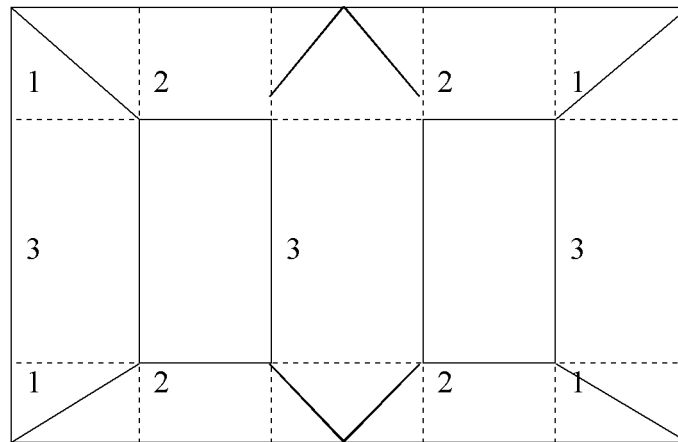


Figure IV.1 : Répartition des poids du noyau

1 : coins.

2 : culasse.

3 : colonne.

$$G_n = G_1 + G_2 + G_3 \quad \text{IV.3}$$

➤ Poids total des coins  $G_1$ :

$$G_1 = \gamma_{fer} \times V_1 \text{ [Kg]} \quad \text{IV.4}$$

$V_1$  : Volume total des coins.

$$V_1 = 6 \times (B_{s1} \times S_{fer}) \text{ dm}^3 \quad \text{IV.5}$$

$\gamma_{fer}$  : Masse volumique des tôles utilisées.

$$\gamma_{fer} = 7.65 \text{ Kg/dm}^3$$

$$G_1 = 7.65 \times 6 \times (180 \times 227.3) \times 10^{-4} \text{ [Kg]}$$

$$\mathbf{G_1 = 187.81 \text{ [Kg]}}$$

➤ Poids des culasses diminuées des coins  $G_2$  :

$$G_2 = \gamma_{fer} \times V_2 \text{ [Kg]} \quad \text{IV.6}$$

$V_2$  : Volume total des culasses en [ $\text{dm}^3$ ].

$$V_2 = 4 \times (L_f \times S_{fer}) \quad \text{IV.7}$$

$$G_2 = 7.65 \times 4 \times 141 \times 227.3 \times 10^{-4} \text{ [kg]}$$

$$\mathbf{G_2 = 98 \text{ kg}}$$

➤ Poids total des colonnes  $G_3$  :

$$G_3 = \gamma_{fer} \times V_3 \text{ [kg]} \quad \text{IV.8}$$

$V_3$  : Volume total des colonnes en [ $dm^3$ ].

$$V_3 = 3(H_c \times S_{fer}) \quad \text{IV.9}$$

$$G_3 = 7.65 \times 3 \times 376.1 \times 227.3 \times 10^{-4} \text{ [kg]}$$

$$\mathbf{G_3 = 196.2 \text{ kg}}$$

$$G_n = G_1 + G_2 + G_3$$

$$G_n = 187.8 + 98 + 196.2$$

$$\mathbf{G_n = 482 \text{ Kg}}$$

Donc :

$$P'_0 = 0.95 \times 1.65 \times 482$$

$$\mathbf{P'_0 = 755.55 \text{ W}}$$

#### IV.2.2. Pertes supplémentaires dans les coins $P_{s1}$ :

Ces pertes sont dues à la non continuité du circuit magnétique, provoquant ainsi un entrefer, donc une distorsion des lignes de champ. Ces dernières sont déviées par rapport au sens de laminage. Les pertes  $P_{s1}$  sont estimées à 50% des pertes fer dans les coins et sont données par la relation suivante :

$$P_{s1} = 0,5 \times \gamma_{1.5} \times K_{BP} \times G_1 \text{ [W]} \quad \text{IV.10}$$

$$P_{s1} = 0.5 \times 0.95 \times 1.65 \times 187.8$$

$$\mathbf{P_{s1} = 147.18 \text{ W}}$$

#### IV.2.3. Perte supplémentaire dans les culasses et les colonnes $P_{s2}$ :

Elles sont dues à la variation de la structure des tôles lors de leur usinage. Elles sont estimées à 15% des pertes dans le noyau sans les coins.

$$P_{s2} = 0.15[\gamma_{1.5} \times K_{BP}(G_2 + G_3)] \text{ [W]} \quad \text{IV.11}$$

$$P_{s2} = 0.15[0.95 \times 1.65(98 + 196.2)]$$

$$\mathbf{P_{s2} = 69.2 \text{ W}}$$

Donc les pertes à vide sont :

$$P_0 = P'_0 + P_{s1} + P_{s2} \quad \text{IV.12}$$

$$P_0 = 833.3 + 162.3 + 76.3$$

$$\mathbf{P_0 = 971.93 \text{ W}}$$

Les pertes à vide calculé sont inférieure à celle du cahier des charge.

### IV.3- Pertes Joule : [3],[6],[9]

Ces pertes sont causées par les courants traversant les enroulements primaire et secondaire, elles sont données par l'essai en court-circuit.

#### IV.3.1. Enroulement basse tension :

##### a- Diamètre moyen de la spire $D_{m2}$ :

$$D_{m2} = D + (2a_{20} \times 10) + a_2 \quad \text{IV.13}$$

$$D_{m2} = 181 + (2 \times 0.5 \times 10) + 17.2$$

$$D_{m2} = 208.2 \text{ mm}$$

##### b- Longueur moyenne de la spire $L_{m2}$ :

$$L_{m2} = \pi \times D_{m2} \quad \text{IV.14}$$

$$L_{m2} = \pi \times 208.2$$

$$L_{m2} = 654.1 \text{ mm}$$

##### c- Longueur totale d'un enroulement $L_2$ :

$$L_2 = N_2 \times L_{m2} \quad \text{IV.15}$$

$$L_2 = 26 \times 654.1$$

$$L_2 = 17006.6 \text{ mm}$$

##### d- Résistance de l'enroulement $R_2$ :

$$R_2 = \rho_t \times \frac{L_2}{S_2} \quad \text{IV.16}$$

$\rho_t$  : Résistance de cuivre à 75°C égal à 0.0215

$S_2$  : Section de fil

$$R_2 = 0.0215 \times \frac{17006.6 \times 10^{-2}}{130.4}$$

$$R_2 = 2.8 \text{ m}\Omega$$

##### e- Poids d'un enroulement $G_{c2}$ :

$$G_{c2} = \delta \times L_2 \times S_2 \quad \text{IV.17}$$

$\delta$  : Densité volumique du cuivre, elle est égale à 8.9 kg/dm<sup>3</sup>

$$G_{c2} = 8.9 \times 17006.6 \times 10^{-2} \times 130.4 \times 10^{-4}$$

$$G_{c2} = 19.73 \text{ kg}$$

**f- Pertes Joule côté basse tension  $P_{cc2}$  :**

Elles sont données par la formule suivante :

$$P_{cc2} = m \times K \times G_{c2} \times J_2^2 \quad \text{IV.18}$$

k : facteur tenant compte de la conductivité du cuivre à 75C°. Pour le cuivre, k = 2.4.

$$P_{cc2} = 3 \times 2.4 \times 19.73 \times 4.17^2$$

$$P_{cc2} = 2470.2 \text{ W}$$

**g- Pertes supplémentaires côté basse tension :**

**1- Pertes externes  $P_{ex}$ :**

Ces pertes sont dues aux isolateurs, aux pièces de sorties et aux bornes de connexions, elles sont données par le tableau IV.2

Tableau III-2 : pertes supplémentaires externes.

D [mm]	A [mm]	Sn [kVA]	Courant basse tension [A]	Pex		
				Sans antinite	Avec antinite	
					a=20mm	a=30mm
28	150	10-30	< 43.3	0		
		50	72.2	5		
		75	103.3	10		
		100	144.3	20		
		125	180.4	30		
		160	231	40		
45	150	200	280	50		
		250	401	70		
		315	455	110		
		400	577	160		
56	150	500	722		100	
		630	909		160	150
70	150	800	1155		190	180
		1000	1443		290	280
		1250	1804		450	430
90	165	1600	2309		560	540

$$P_{ex} = 160 \text{ W}$$

**2- Pertes internes  $P_{in}$ :**

Elles sont données par l'expression suivante :

$$P_{in} = \frac{E \times K \times m \times J_2^2 \times G_{c2} \times F}{N_2}$$

E: facteur tenant compte des pertes supplémentaires, des pertes dans la cuve et la partie constructive du noyau

F : facteur empirique fonction du couplage des enroulements côté basse tension.

Les facteurs E et F sont donnés par le tableau IV.3

Tableau IV.3. Facteurs E et F en fonction du couplage des enroulements et du courant au secondaire

Intensité du courant secondaire [A]	E	F	
		$\Delta Y$	Z
30 – 100	1.04	1.0	1.0
101 – 400	1.05		
401 – 700	1.07		2.0
701 – 1200	1.09		
1201 – 1500	1.12		
1501 - 1800	1.15		
1801 - 2400	1.20		

Donc pour un courant secondaire égal à 577.35A on a : E = 1.07 et F = 1.0

$$P_{in} = \frac{1.07 \times 2.4 \times 3 \times 4.17^2 \times 19.73 \times 1}{26}$$

$$P_{in} = 101.7 \text{ W}$$

### 3- Pertes par connexion $P_{con2}$ :

Elles sont dues à la résistance des fils qui relient les différentes phases du transformateur, leur valeur dépend de la longueur et de la section des fils de connexion.

$$P_{con2} = R_{con2} \times I_{ph2}^2 \quad \text{IV.20}$$

$R_{con2}$  : la résistance de connexion.

$$R_{con2} = \frac{\rho_{75^\circ\text{C}} \times L_{con}}{S_{2n}} \quad \text{IV.21}$$

$$L_{con} = 7.5 \times h_{b2}$$

$$L_{con} = 7.5 \times 332.1$$

$$L_{con} = 2490 \text{ mm}$$

$$R_{con2} = \frac{0.0215 \times 2490 \times 10^{-3}}{130.1}$$

$$R_{con2} = 0.411 \text{ m}\Omega$$

Donc :

$$P_{con2} = 0.411 \times 10^{-3} \times 577.35^2$$

$$P_{con2} = 137.15 \text{ W}$$

#### 4- Pertes par effet pelliculaire $P_{sup2}$ :

Elles sont dues à l'effet de peau électrique et sont données par la relation suivante :

$$P_{sup2} = (K_{mr2} - 1) \times R_2 \times m \times I_{ph2}^2 \quad \text{IV.22}$$

$K_{mr2}$ : Coefficient de majoration de la résistance en courant alternatif.

$m$  : nombre de phases.

Pour un conducteur méplat,  $K_{mr2}$  est donné par la relation suivante :

$$K_{mr2} = 1 + \frac{N_c^2 - 0.2}{9} (\alpha_2 a)^4 \quad \text{IV.23}$$

$N_c$  : Nombre de couches

$$\alpha_2 = \sqrt{\frac{N_{s2/c} \times b \times \mu_0 \times \omega}{h_{m2} \times 2\rho}} \quad \text{IV.24}$$

$b$  : largeur du conducteur nu.

$h_{m2}$  : Hauteur magnétique.

$N_{s2/c}$ : Nombre de conducteurs dans le sens de la hauteur.

$\omega$  : pulsation du réseau avec  $\omega = 2\pi f$  et  $f$  la fréquence.

$\mu_0$  : Perméabilité magnétique du vide.

$$\alpha_2 = \sqrt{\frac{27 \times 11.8 \times 10^{-3} \times 4\pi \times 10^{-7} \times 2\pi \times 50}{319.8 \times 10^{-3} \times 2 \times 0.0215 \times 10^{-6}}}$$

$$\alpha_2 = 95.63$$

$$K_{mr2} = 1 + \frac{2^2 - 0.2}{9} (95.63 \times 6.1 \times 10^{-3})^4$$

$$K_{mr2} = 1.05$$

$$P_{sup2} = (1.05 - 1) \times 2.8 \times 10^{-3} \times 3 \times 577.35^2$$

$$P_{sup2} = 140 \text{ W}$$

h- Pertes totales en charge côté basse tension :

$$P_{cc2} = P'_{cc2} + P_{ex} + P_{in} + P_{sup2} + P_{con} \quad \text{IV.25}$$

$$P_{cc2} = 2470.2 + 160 + 101.7 + 140 + 137.15$$

$$P_{cc2} = 3009 \text{ W}$$

#### IV-3-2. ENROULEMENT HAUTE TENSION:

a- Diamètre moyen de la spire  $D_{m1}$ :

$$D_{m1} = D + (2a_{20} \times 10) + 2a_{12} + 2a_2 + a_1 \quad \text{IV.26}$$

$$D_{m1} = 181 + (2 \times 0.5) + (2 \times 15) + (2 \times 17.2) + 33.75$$

$$D_{m1} = 289.15 \text{ mm}$$

b- Longueur moyenne de la spire:  $L_{m1}$

$$L_{m1} = D_{m1} \times \pi \quad \text{IV.27}$$

$$L_{m1} = 289.15 \times \pi$$

$$L_{m1} = 908.4 \text{ mm}$$

c- Longueur totale d'un enroulement :  $L_1$

$$L_1 = N_1 \times L_{m1} \quad \text{IV.28}$$

$$L_1 = 3377 \times 908.4$$

$$L_1 = 3067.7 \text{ m}$$

d- Résistance de l'enroulement  $R_1$ :

$$R_1 = \rho_t \times \frac{L_1}{S_{1n}} \quad \text{IV.29}$$

$$R_1 = 0.0215 \times \frac{3067.7}{1.36}$$

$$R_1 = 48.5 \Omega$$

e- Poids d'un enroulement  $G_{c1}$ :

$$G_{c1} = \delta \times L_1 \times S_1 \quad \text{IV.30}$$

$\delta$  : Densité volumique du cuivre, elle est égale à  $8.9 \text{ kg/dm}^3$ .

$$G_{c1} = 8,9 \times 3067.7 \times 1.36 \times 10^{-3}$$

$$\mathbf{G_{c1} = 37.15 \text{ kg}}$$

f- Pertes Joule côté haute tension  $P'_{cc1}$ :

$$P'_{cc1} = m \times K \times G_{c1} \times J_1^2 \quad \text{IV.31}$$

$$P'_{cc1} = 3 \times 2.4 \times 37.15 \times 3.26^2$$

$$\mathbf{P'_{cc1} = 2842.67 \text{ W}}$$

## g- Pertes supplémentaires côté haute tension :

1- Pertes par connexion  $P_{con1}$  :

$$P_{con1} = R_{con1} \times I_{ph1}^2 \quad \text{IV.32}$$

$R_{con1}$  : La résistance de connexion.

$$R_{con1} = \frac{\rho_{75^\circ\text{C}} \times L_{con1}}{S_{1n}} \quad \text{IV.33}$$

$$L_{con} = 7.5 \times h_{b1}$$

$$L_{con} = 7.5 \times 306$$

$$\mathbf{L_{con} = 2295 \text{ mm}}$$

$$R_{con1} = \frac{0.0215 \times 2295 \times 10^{-3}}{1.36}$$

$$\mathbf{R_{con1} = 36.28 \text{ m}\Omega}$$

Donc :

$$P_{con1} = 36,28 \times 10^{-3} \times 7,69^2$$

$$\mathbf{P_{con1} = 2,14 \text{ W}}$$

2- Pertes par effet pelliculaire  $P_{sup1}$  :

$$P_{sup1} = (K_{mr1} - 1) \times R_1 \times m \times I_{ph1}^2 \quad \text{IV.34}$$

$$K_{mr1} = 1 + \frac{m_c^2 - 0,2}{9} (\alpha_1 d_{1n})^4 \quad \text{IV.35}$$

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{N_{s1/c} \times b \times \mu_0 \times \omega}{h_{m1} \times 2\rho}}$$

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{222 \times 1.32 \times 10^{-3} \times 4\pi \times 10^{-7} \times 2\pi \times 50}{306 \times 10^{-3} \times 2 \times 0.0215 \times 10^{-6}}}$$

$$\alpha_1 = 93.7$$

Donc :

$$K_{mr1} = 1 + \frac{16^2 - 0.2}{9} (92.25 \times 1.32 \times 10^{-3})^4$$

$$K_{mr1} = 1.006$$

$$P_{sup1} = (1.006 - 1) \times 48.5 \times 3 \times 7.69^2$$

$$P_{sup1} = 51.62 \text{ W}$$

### 3- Pertes joule totales coté haute tension $P_{cc1}$ :

$$P_{cc1} = P_{sup1} + P_{con1} + P'_{cc1} \quad \text{IV.36}$$

$$P_{cc1} = 51.62 + 2.14 + 2842.67$$

$$P_{cc1} = 2896.58 \text{ W}$$

#### IV.3.3. Pertes joules totales $P_{cc}$ :

$$P_{cc} = P_{cc1} + P_{cc2} \text{ [W]} \quad \text{IV.37}$$

$$P_{cc} = 3009 + 2896.58$$

$$P_{cc} = 5905.58 \text{ W}$$

Les pertes en charge calculé sont inférieure à celle du cahier des charges.

➤ Poids total du cuivre :

$$G_c = m \times (G_{c1} + G_{c2}) \quad \text{IV.38}$$

$$G_c = 3 \times (37.15 + 19.73)$$

$$G_c = 170.64 \text{ kG}$$

#### IV.4. Calcul définitif de la tension de court-circuit $U_{cc}$ : [3],[6],[9]

La valeur de la composante réactive de la tension de court-circuit est connue d'après les résultats du chapitre III. On peut alors déterminer la valeur de la tension de court-circuit.

Calcul la composante active :

$$U_{cca} = \frac{P_{cc}}{S_n} \times 100 \quad \text{IV.39}$$

$$U_{cca} = \frac{5905.58}{400 \times 10^3} \times 100$$

$$U_{cca} = 1.47 \%$$

La valeur de la composante réactive étant  $U_{ccr} = 4.45 \%$ , alors :

$$U_{cc} = \sqrt{U_{cca}^2 + U_{ccr}^2} \quad \text{IV.40}$$

$$U_{cc} = \sqrt{1.47^2 + 4.45^2}$$

$$U_{cc} = 4.68 \%$$

➤ L'erreur commise sur la valeur de la tension de court-circuit est :

$$\frac{\Delta U_{cc}}{U_{ncc}} = \frac{|U_{ncc} - U_{cc}|}{U_{ncc}} \times 100 \quad \text{IV.41}$$

$U_{ncc}$  : la valeur de la tension de court-circuit donnée par le cahier des charges.

$$\frac{\Delta U_{cc}}{U_{ncc}} = \frac{|4.5 - 4.68|}{4.5} \times 100$$

$$\frac{\Delta U_{cc}}{U_{ncc}} = 4 \%$$

#### IV.5. Calcul du rendement $\eta$ : [3],[9],[8]

Il est donné par la relation suivante :

$$\eta = \left( 1 - \frac{P_0 + \alpha^2 P_{cc}}{\alpha S_n \cos \varphi_2 + P_0 + \alpha^2 P_{cc}} \right) \times 100\% \quad \text{IV.42}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{P_0}{P_{cc}}} \quad \text{IV.43}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{971.93}{5905.58}}$$

$$\alpha = 0.405$$

Rendement pour une charge purement résistive  $\cos \varphi_2 = 1$  :

$$\eta = \left( 1 - \frac{971.93 + (0.405^2 \times 5905.58)}{(0.405 \times 400 \times 10^3 \times 1) + 971.93 + (0.405^2 \times 5905.58)} \right) \times 100\%$$

$$\eta = 98.81 \%$$

Rendement pour charge inductive  $\cos \varphi_2 = 0.8$  :

$$\eta = \left( 1 - \frac{971.93 + (0.405^2 \times 5905.58)}{(0.405 \times 400 \times 10^3 \times 0.8) + 971.93 + (0.405^2 \times 5905.58)} \right) \times 100\%$$

$$\eta = \mathbf{98,52\%}$$

#### IV.6. Calcul de la chute de tension $\Delta U$ : [3],[6],[9]

La variation de la tension est donnée par la formule ci-dessous :

$$\Delta U(\%) = \alpha(U_{cca} \cos \varphi_2 + U_{ccr} \sin \varphi_2) \quad \text{IV.44}$$

$$\Delta U(\%) = \alpha(1.47 \cdot \cos \varphi_2 + 4.45 \cdot \sin \varphi_2)$$

➤ Cas d'une charge purement résistive :

$$\cos \varphi_2 = 1 \rightarrow \sin \varphi_2 = 0$$

$$\Delta U(\%) = \alpha[(1.47 \times 1) + (4.45 \times 0)]$$

$$\Delta U(\%) = 1.47\alpha$$

$$\Delta U(\%) = 1.47 \times 0.405$$

$$\Delta U(\%) = \mathbf{0.59}$$

$$\Delta U = \frac{U_{2n} \times \Delta U(\%)}{100} \quad [V] \quad \text{IV.45}$$

$$\Delta U = \frac{400 \times 0.59}{100}$$

$$\Delta U = \mathbf{2.36 V}$$

➤ Cas d'une charge inductive :

$$\cos \varphi_2 = 0.8 \rightarrow \sin \varphi_2 = 0.6$$

$$\Delta U(\%) = \alpha[(1.47 \times 0.8) + (4.45 \times 0.6)]$$

$$\Delta U(\%) = 3.84 \times 0.405$$

$$\Delta U(\%) = \mathbf{1.55}$$

$$\Delta U = \frac{U_{2n} \times \Delta U(\%)}{100} \quad [V]$$

$$\Delta U = \frac{400 \times 1.55}{100}$$

$$\Delta U = \mathbf{6.2 V}$$

➤ Cas d'une charge capacitive :

$$\cos \varphi_2 = 0.8 \rightarrow \sin \varphi_2 = -0.6$$

$$\Delta U(\%) = \alpha[(1.47 \times 0.8) + (4.45 \times -0.6)]$$

$$\Delta U(\%) = -1.49 \times 0.395$$

$$\Delta U(\%) = -0.6$$

$$\Delta U = \frac{U_{2n} \times \Delta U(\%)}{100} [V]$$

$$\Delta U = \frac{400 \times (-0.6)}{100}$$

$$\Delta U = -2.4 V$$

#### IV.7. Calcul du courant à vide : [3],[6],[9]

$$\frac{I_{10}}{I_{n1}} = \frac{G_{fer} \cdot P'_{01,5} \cdot K_{ks} \cdot K_{ws} \cdot K_{bs}}{S_n} \times 100 \quad \text{IV.46}$$

$G_{fer}$  : Poids du fer égal à 482 kg.

$P'_{01,5} = 3.45 W$  , représente les pertes à vide pour une induction magnétique de 1.5 T.

$K_{ks}$  : Facteur de forme du noyau en fonction du diamètre de la colonne.

$K_{ks} = 1.01$ , pour  $D = 181$  mm.

$K_{ws}$  : Facteur de forme de la bobine égal à 1 pour les bobines circulaires.

$K_{bs} = 5.062$  pour  $B_c = 1.81 T$ .

$$\frac{I_{10}}{I_{n1}} = \frac{482 \times 3.45 \times 1.01 \times 1 \times 5.062}{400 \times 10^3} \times 100 [\%]$$

$$\frac{I_{10}}{I_{n1}} = 2.12 \%$$

# CHAPITRE V

## Calcul thermique

**VI.1. introduction :**

Lors de son fonctionnement, le transformateur est le siège de pertes d'énergie, qui sont localisées dans deux éléments principaux :

Dans Le circuit magnétique : elles sont dues à la variation du flux alternatif dans les tôles magnétiques.

Dans les enroulements : elles sont dues en grande partie à l'effet Joule.

Ces pertes se dégagent dans le noyau et dans les enroulements, elles se transforment en énergie thermique et provoquent l'échauffement des parties correspondantes du transformateur.

La transmission de chaleur se fait selon trois formes : par conduction (cuivre, fer, isolants), par convection (liquides), par rayonnement (ondes électromagnétiques).

**V.2- Echauffement du circuit magnétique :[6],[9]**

En raison de l'hétérogénéité du circuit magnétique, on assimile la section d'une colonne à celle d'un rectangle de côtés X et Y.

$$X = 0.9 \times D \quad \text{V.1}$$

X : la longueur du rectangle.

D : le diamètre de la colonne

$$X = 0.9 \times 18.1$$

$$X = 16.29 \text{ cm}$$

Y : largeur du rectangle.

$$Y = \frac{S_{fer}}{X} \quad \text{V.2}$$

$S_{fer}$  : Section de la colonne.

$$Y = \frac{227.3}{16.29}$$

$$Y = 13.95 \text{ cm}$$

**V.2.1- Echauffement maximal du circuit magnétique par rapport à la surface dans la direction longitudinale :**

$$\theta_1 = \frac{P \times X^2}{8 \times \lambda_1} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad \text{V.3}$$

$\lambda_1$  : Conductivité thermique longitudinale [ W/m. °C ]

P : Pertes spécifiques des tôles par unité de volume.

$$P = P_{sp} \times \lambda_{fer} \quad [W/m^3] \quad V.4$$

$\lambda_{fer}$  : Masse volumique des tôles.

$P_{sp}$  : Pertes spécifiques par unité de masse.

$$P_{sp} = \lambda_{1.5} \times K_{BP} \quad [W/kg] \quad V.5$$

$$P_{sp} = 0.95 \times 1.82$$

$$P_{sp} = 1.729 \quad W/kg$$

Donc :

$$P = 1.729 \times 7650$$

$$P = 13226 \quad W/m^3$$

$$\theta_1 = \frac{13226 \times (16.29 \times 10^{-2})^2}{8 \times 20}$$

$$\theta_1 = 2.19 \quad ^\circ C$$

**V.2.2- Echauffement maximal du circuit magnétique par rapport à la surface dans la direction transversale :**

$$\theta'_1 = \frac{P \times Y^2}{8 \times \lambda_t} \quad [^\circ C] \quad V.6$$

$\lambda_t$  : Conductivité thermique transversale [ W/m. °C ]

$$\theta'_1 = \frac{13226 \times (13.95 \times 10^{-2})^2}{8 \times 3}$$

$$\theta'_1 = 10.72 \quad ^\circ C$$

**V.2.3- Différence de température entre la surface du circuit magnétique et l'huile dans la direction longitudinale :**

$$\theta_2 = \frac{P \times X}{2 \times \alpha_{con}} \quad [^\circ C] \quad V.7$$

$\alpha_{con}$  : Coefficient de convection de l'huile sa valeur comprise entre 100 et 110 W/m<sup>2</sup>.°C.

On prend  $\alpha_{con} = 110$ .

$$\theta_2 = \frac{13226 \times 16.29 \times 10^{-2}}{2 \times 110} \quad [^\circ C]$$

$$\theta_2 = 9.79 \quad ^\circ C$$

**V.2.4- Différence de température entre la surface du circuit magnétique et l'huile dans la direction transversale :**

$$\theta'_2 = \frac{P \times Y}{2 \times \alpha_{con}} \quad [^\circ C] \quad V.8$$

$$\theta'_2 = \frac{13226 \times 13.95 \times 10^{-2}}{2 \times 110} \text{ [}^\circ\text{C]} \\ \theta'_2 = 8.38 \text{ }^\circ\text{C}$$

### V.2.5- Echauffement maximal du circuit magnétique dans la direction longitudinale :

$$\theta_{1max} = \theta_1 + \theta_2 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad \text{V.9} \\ \theta_{1max} = 2.19 + 9.79 \\ \theta_{1max} = 11.98 \text{ }^\circ\text{C}$$

### V.2.6- Echauffement maximal du circuit magnétique dans la direction transversale :

$$\theta_{2max} = \theta'_1 + \theta'_2 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad \text{V.10} \\ \theta_{2max} = 10.72 + 8.38 \\ \theta_{2max} = 19.1 \text{ }^\circ\text{C}$$

D'où l'échauffement moyen résultant du circuit magnétique par rapport à l'huile est :

$$\theta_{max/h} = \theta_{2max} - \frac{\theta'_2 + 1.5\theta'_1}{\theta_{2max} + \theta'_2 + 1.5\theta'_1} \quad \text{V.11} \\ \theta_{max/h} = 19.1 - \frac{8.38 + (1.5 \times 10.72)}{19.1 + 8.38 + (1.5 \times 10.72)} \\ \theta_{max/h} = 18.54 \text{ }^\circ\text{C}$$

## V.3- Echauffement dans les enroulements : [6],[9]

### V.3.1- Echauffement moyen de l'enroulement secondaire par rapport à l'huile :

Le diamètre intérieur est :

$$D_{i2} = 182 \text{ mm}$$

Le diamètre extérieur est :

$$D_{ex2} = 216.4 \text{ mm}$$

Le nombre de cales utilisées est donné par le tableau V.1.

Tableau V.1. Nombre de cales utilisées en fonction du diamètre extérieur.

Diamètre extérieur [mm]	150-250	250-380	380-500	500-600	900-1200
Nombre de cales	6	8	10	12	14-16

Nous prenons le nombre de cales  $N_{cal} = 6$ .

#### a- Calcul de la surface intérieur de l'enroulement en contact avec l'huile :

La surface intérieure de l'enroulement est donnée par la formule suivante :

$$S_{i2} = \pi \times D_{i2} \times h_{B2} \quad \text{V.12}$$

$$S_{i2} = \pi \times 18.2 \times 31.6$$

$$S_{i2} = \mathbf{1806.8 \text{ cm}^2}$$

Le coefficient tenant compte de la surface intérieure de l'enroulement occupée par les cales est donné par la formule suivante :

$$K_{i2} = \frac{(\pi \times D_{i2}) - (N_{cal} \times L_{cal})}{\pi \times D_{i2}} \quad \text{V.13}$$

$L_{cal}$  : Largeur de la cale égale à 0.5 cm.

$$K_{i2} = \frac{(\pi \times 18.2) - (6 \times 0.5)}{\pi \times 18.2}$$

$$K_{i2} = \mathbf{0.94}$$

La surface en contact avec l'huile est donc:

$$S_{i2} K_{i2} = \mathbf{1698,4 \text{ cm}^2}$$

#### b- Calcul de la surface extérieure de l'enroulement en contact avec l'huile :

La surface extérieure est donnée par la formule suivante :

$$S_{ex2} = \pi \times D_{ex2} \times h_{B2} \quad \text{V.14}$$

$$S_{ex2} = \pi \times 21.64 \times 31.6$$

$$S_{ex2} = \mathbf{2148.3 \text{ cm}^2}$$

Le coefficient tenant compte de la surface intérieure de l'enroulement occupée par les cales est donné par la formule suivante :

$$K_{ex2} = \frac{(\pi \times D_{ex2}) - (N_{cal} \times L_{cal})}{\pi \times D_{ex2}} \quad \text{V.15}$$

$L_{cal}$  : Largeur de la cale égale à 0.5 cm.

$$K_{ex2} = \frac{(\pi \times 21.64) - (6 \times 0.5)}{\pi \times 21.64}$$

$$K_{ex2} = 0.95$$

Donc la surface en contact avec l'huile est :

$$S_{ex2} K_{ex2} = 2040.9 \text{ cm}^2$$

### c- Calcul de la conductivité résultante de l'enroulement :

$$\lambda_{res} = \frac{\lambda_i \times L}{2 \times L_i (m_c - 1)} \quad \text{V.16}$$

$\lambda_i$  : conductivité du papier égale à 0.2 W/m.°C.

$L_i$  : Épaisseur de l'isolation du conducteur.

L : épaisseur de l'enroulement sans isolation.

$m_c$  : Nombre de couches.

$$\lambda_{res} = \frac{0.2 \times 16.2}{2 \times 1(2 - 1)}$$

$$\lambda_{res} = 1.61 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$$

### d- Calcul des résistances thermiques de l'isolation périphérique :

➤ Intérieure :

$$R_{i2} = \frac{L_i}{\lambda_i \times S_{i2} K_{i2}} + \frac{1}{\alpha_{con} \times S_{i2} K_{i2}} \quad [^\circ\text{C}/\text{w}] \quad \text{V.17}$$

$$R_{i2} = \frac{0.5 \times 10^{-3}}{0.2 \times 0.1698} + \frac{1}{110 \times 0.1698}$$

$$R_{i2} = 0.045 \text{ }^\circ\text{C}/\text{w}$$

➤ Extérieure :

$$R_{ex2} = \frac{L_i}{\lambda_i \times S_{ex2} K_{ex2}} + \frac{1}{\alpha_{con} \times S_{ex2} K_{ex2}} \quad [^\circ\text{C}/\text{w}]$$

$$R_{ex2} = \frac{0.5 \times 10^{-3}}{0.2 \times 0.204} + \frac{1}{110 \times 0.204}$$

$$R_{ex2} = 0.036 \text{ }^\circ\text{C}/\text{w}$$

**e- Distance à laquelle la température est maximale :**

Cette distance est donnée par la formule suivante :

$$X = L \times \frac{R_{ex2} \cdot S_{ex2} + \frac{L}{2\lambda_{res}}}{R_{i2}S_{i2} + R_{ex2}S_{ex2} + \frac{L}{\lambda_{res}}} \quad \text{V.18}$$

$$X = 0.162 \times \frac{0.0122 \times 0.204 + \frac{0.162}{2 \times 1.61}}{0.0147 \times 0.1698 + 0.0147 \times 0.204 + \frac{0.162}{1.61}}$$

$$X = 0.08 \text{ m}$$

$$L - X = 0.082 \text{ m}$$

**f- Calcul des flux thermiques :**

Calcul du rapport des flux  $i$  :

$$i = \frac{P_{ex2}}{P_{i2}} = \frac{(L - X) \times S_{ex2}}{X \times S_{i2}} \quad \text{V.19}$$

$P_{ex2}$  : flux thermique qui traverse la surface  $S_{ex2}K_{ex2}$ .

$P_{i2}$  : flux thermique qui traverse la surface  $S_{i2}K_{i2}$ .

$$i = 1.26$$

➤ Le flux thermique qui traverse la surface  $S_{ex2}K_{ex2}$ .

$$P_{ex2} = \frac{P_{cu}}{1 + \frac{1}{i}} \quad \text{V.20}$$

Avec :

$$P_{cu} = \frac{P_{cc2}}{3} \quad \text{V.21}$$

$P_{cc2}$  : pertes Joule dans l'enroulement secondaire.

$P_{cu}$  : pertes Joule dans la bobine.

$$P_{cu} = \frac{2775.26}{3}$$

$$P_{cu} = 925 \text{ W}$$

$$P_{ex2} = \frac{925}{1 + \frac{1}{1.26}}$$

$$P_{ex2} = 515.7 \text{ W}$$

- flux thermique qui traverse la surface  $S_{i2}K_{i2}$ .

$$P_{i2} = \frac{P_{cu}}{i + 1} \quad \text{V.22}$$

$$P_{i2} = \frac{925}{1.26 + 1}$$

$$P_{i2} = 409.3 \text{ W}$$

### g- Calcul des résistances thermiques internes :

- Intérieure :

$$R_{ii2} = \frac{X}{2\lambda_{res} \times S_{i2}K_{i2}} \quad \text{V.23}$$

$$R_{ii2} = \frac{0.08 \times 10^{-2}}{2 \times 1.61 \times 0.1698}$$

$$R_{ii2} = 0.012 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

- Extérieure :

$$R_{iex2} = \frac{L - X}{2\lambda_{res} \times S_{i2}K_{i2}} \quad \text{V.24}$$

$$R_{iex2} = \frac{0.082 \times 10^{-2}}{2 \times 1.61 \times 0.204}$$

$$R_{iex2} = 0.012 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

### h- Calcul de la température maximale de l'enroulement :

- Intérieur :

$$\theta_{max2} = P_{i2}(R_{i2} + R_{ii2}) \quad \text{V.25}$$

$$\theta_{max2} = 409.3(0.045 + 0.012)$$

$$\theta_{max2} = 23.3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Extérieur :

$$\theta'_{max} = P_{ex2}(R_{ex2} + R_{iex2}) \quad \text{V.26}$$

$$\theta'_{max} = 515.7(0.03 + 0.012)$$

$$\theta'_{max} = 21.65 \text{ } ^\circ\text{C}$$

**i- Calcul des températures de l'enroulement :**

➤ Intérieur :

$$\begin{aligned}\theta_{i2} &= P_{i2} \times R_{ii2} && \text{V.27} \\ \theta_{i2} &= 409.3 \times 0.012 \\ \theta_{i2} &= \mathbf{4.9} \text{ } ^\circ\text{C}\end{aligned}$$

➤ Extérieur :

$$\begin{aligned}\theta_{ex2} &= P_{ex2} \times R_{iex2} && \text{V.28} \\ \theta_{ex2} &= 515.7 \times 0.012 \\ \theta_{ex2} &= \mathbf{6.18} \text{ } ^\circ\text{C}\end{aligned}$$

La température moyenne de l'enroulement secondaire par rapport à l'huile est :

$$\begin{aligned}\theta_{moy2/h} &= \theta_{max2} - \frac{i \times (\theta_{ex2} + \theta_{i2})}{3 \times (i + 3)} && \text{V.29} \\ \theta_{moy2/h} &= 23,3 - \frac{1.26 \times (6.18 + 4.9)}{3 \times (1.26 + 3)} \\ \theta_{moy2/h} &= \mathbf{21.21} \text{ } ^\circ\text{C}\end{aligned}$$

**V.3.2- Echauffement moyen de l'enroulement primaire par rapport à l'huile :**

Le diamètre intérieur est :

$$D_{i1} = 246 \text{ mm}$$

Le diamètre extérieur est :

$$D_{ex1} = 306,4 \text{ mm}$$

**a- Calcul de la surface intérieure de l'enroulement en contact avec l'huile :**

La surface intérieure de l'enroulement est donnée par la formule suivante :

$$\begin{aligned}S_{i1} &= \pi \times D_{i2} \times h_{B1} && \text{V.30} \\ S_{i1} &= \pi \times 24.6 \times 30.6 \\ S_{i1} &= \mathbf{2364.9} \text{ cm}^2\end{aligned}$$

Le coefficient tenant compte de la surface intérieure de l'enroulement occupée par les cales est donné par la formule suivante :

$$K_{i1} = \frac{(\pi \times D_{i1}) - (N_{cal} \times L_{cal})}{\pi \times D_{i1}} \quad \text{V.31}$$

$L_{cal}$  : Largeur de la cale égale à 0.5 cm.

$$K_{i1} = \frac{(\pi \times 24.6) - (6 \times 0.5)}{\pi \times 24.6}$$

$$K_{i1} = 0.92$$

Donc la surface en contact avec l'huile est :

$$S_{i1}K_{i1} = 2175.7 \text{ cm}^2$$

#### b- Calcul de la surface extérieure de l'enroulement en contact avec l'huile :

La surface extérieure est donnée par la formule suivante :

$$S_{ex1} = \pi \times D_{ex1} \times h_{B1} \quad \text{V.32}$$

$$S_{ex1} = \pi \times 30.64 \times 30.6$$

$$S_{ex1} = 2945.5 \text{ cm}^2$$

Le coefficient tenant compte de la surface intérieure de l'enroulement occupée par les cales est donné par la formule suivante :

$$K_{ex1} = \frac{(\pi \times D_{ex1}) - (N_{cal} \times L_{cal})}{\pi \times D_{ex1}} \quad \text{V.33}$$

$L_{cal}$  : Largeur de la cale égale à 0.5 cm.

$$K_{ex1} = \frac{(\pi \times 30.64) - (6 \times 0.5)}{\pi \times 30.64}$$

$$K_{ex1} = 0.96$$

Donc la surface en contact avec l'huile est :

$$S_{ex1}K_{ex1} = 2827.7 \text{ cm}^2$$

#### c- Calcul de la conductivité résultante de l'enroulement :

$$\lambda_{res} = \frac{\lambda_v \times a_1}{2 \times L_i(m_c - 1)} \quad \text{V.34}$$

$\lambda_v$  : conductivité du vernis égale à 0.17 W/m.°C.

$L_i$  : épaisseur de l'isolation du conducteur.

$a_1$  : épaisseur de l'enroulement sans isolation.

$m_c$  : Nombre de couches.

$$\lambda_{res} = \frac{0.17 \times 33.75}{2 \times 1(16 - 1)}$$

$$\lambda_{res} = 0.19 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$$

**d- Calcul des résistances thermiques de l'isolation périphérique :**

➤ Intérieure :

$$R_{i1} = \frac{1}{s_{i1}} \times \left[ \frac{L_i + d_i}{\lambda_v} + \frac{1}{\alpha_{con}} \right] \text{ °C/W} \quad \text{V.35}$$

$$R_{i1} = \frac{1}{0.2175} \times \left[ \frac{(0.1 + 0.2)10^{-2}}{0.17} + \frac{1}{110} \right]$$

$$\mathbf{R_{i1} = 0.115 \text{ °C/W}}$$

➤ Extérieure :

$$R_{ex1} = \frac{1}{s_{ex1}} \times \left[ \frac{L_i + d_i}{\lambda_v} + \frac{1}{\alpha_{con}} \right] \text{ °C/W} \quad \text{V.36}$$

$$R_{ex1} = \frac{1}{0.2827} \times \left[ \frac{(0.1 + 0.2)10^{-2}}{0.17} + \frac{1}{110} \right]$$

$$\mathbf{R_{ex1} = 0.094 \text{ °C/W}}$$

**e- Distance à laquelle la température est maximale :**

Cette distance est donnée par la formule suivante :

$$X = a_1 \times \frac{R_{ex1} \cdot S_{ex1} + \frac{L}{2\lambda_{res}}}{R_{i1}S_{i1} + R_{ex1}S_{ex1} + \frac{a_1}{\lambda_{res}}} \quad \text{V.37}$$

$$X = 0.337 \times \frac{(0.038 \times 0.2827) + \frac{0.337}{2 \times 0.19}}{(0.049 \times 0.2175) + (0.038 \times 0.2827) + \frac{0.337}{0.19}}$$

$$\mathbf{X = 0.168 \text{ m}}$$

$$\mathbf{a_1 - X = 0.168 \text{ m}}$$

**f- Calcul des flux thermiques :**Calcul du rapport des flux  $i$  :

$$i = \frac{P_{ex1}}{P_{i1}} = \frac{(L - X) \times S_{ex1}}{X \times S_{i1}} \quad \text{V.38}$$

 $P_{ex1}$  : flux thermique qui traverse la surface  $S_{ex1}K_{ex1}$ . $P_{i1}$  : flux thermique qui traverse la surface  $S_{i1}K_{i1}$ .

$$i = \frac{0.168 \times 0.2827}{0.168 \times 0.2175}$$

$$\mathbf{i = 1.32}$$

- Le flux thermique qui traverse la surface  $S_{ex1}K_{ex1}$ .

$$P_{ex1} = \frac{P_{cu}}{3(1 + \frac{1}{i})} \quad [W] \quad \text{V.39}$$

Avec :

$$P_{cu} = \frac{P_{cc1}}{3} \quad \text{V.40}$$

$P_{cc1}$  : pertes Joule dans l'enroulement primaire.

$P_{cu}$  : pertes Joule dans la bobine.

$$P_{cu} = \frac{2842.67}{3}$$

$$P_{cu} = 947.5 \text{ W}$$

$$P_{ex1} = \frac{947.5}{3 \times (1 + \frac{1}{1.32})}$$

$$P_{ex1} = 179.7 \text{ W}$$

- flux thermique qui traverse la surface  $S_{i1}K_{i1}$ .

$$P_{i1} = \frac{P_{cu}}{3(i + 1)} \quad \text{V.41}$$

$$P_{i1} = \frac{947.5}{3 \times (1.32 + 1)}$$

$$P_{i1} = 136.1 \text{ W}$$

### g- Calcul des résistances internes :

- Intérieure :

$$R_{ii1} = \frac{X}{2\lambda_{res} \times S_{i1}K_{i1}} \quad [^{\circ}\text{C}/\text{W}] \quad \text{V.42}$$

$$R_{ii1} = \frac{0.168 \times 10^{-2}}{2 \times 0.19 \times 0.2175}$$

$$R_{ii1} = 0.02 \quad ^{\circ}\text{C}/\text{W}$$

- Extérieure :

$$R_{iex1} = \frac{L - X}{2\lambda_{res} \times S_{i1}K_{i1}} \quad [^{\circ}\text{C}/\text{W}] \quad \text{V.43}$$

$$R_{iex1} = \frac{0.168 \times 10^{-2}}{2 \times 0.19 \times 0.2827}$$

$$R_{iex1} = \mathbf{0.015 \text{ } ^\circ\text{C/W}}$$

#### h- Calcul de la température maximale de l'enroulement :

➤ Intérieur :

$$\theta_{max1} = P_{i1}(R_{i1} + R_{ii1}) \quad \text{V.44}$$

$$\theta_{max1} = 136.1(0.115 + 0.02)$$

$$\theta_{max1} = \mathbf{18.37 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

➤ Extérieur :

$$\theta'_{max} = P_{ex1}(R_{ex1} + R_{iex1}) \quad \text{V.45}$$

$$\theta'_{max} = 179.7(0.094 + 0.015)$$

$$\theta'_{max} = \mathbf{19.58 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

#### i- Calcul des températures de l'enroulement :

➤ Intérieur :

$$\theta_{i1} = P_{i1} \times R_{ii1} \quad \text{V.46}$$

$$\theta_{i1} = 136.1 \times 0.02$$

$$\theta_{i1} = \mathbf{2.72 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

➤ Extérieur :

$$\theta_{ex1} = P_{ex1} \times R_{iex1} \quad \text{V.47}$$

$$\theta_{ex1} = 179.7 \times 0.015$$

$$\theta_{ex1} = \mathbf{2.7 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

La température moyenne de l'enroulement secondaire par rapport à l'huile est :

$$\theta_{moy1/h} = \theta_{max1} - \frac{i \times (\theta_{ex1} + \theta_{i1})}{3 \times (i + 3)} \quad \text{V.48}$$

$$\theta_{moy1/h} = 19,58 - \frac{0.19 \times (2.7 + 2.72)}{3 \times (0.19 + 3)}$$

$$\theta_{moy1/h} = \mathbf{19.48 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

# CHAPITRE VI

## Dimensionnement de la cuve

**VI.1- Introduction :**

Le dimensionnement de la cuve d'un transformateur est très important dans le calcul des transformateurs, puisqu'elle assure plusieurs fonctions à savoir : la protection de la partie active de tout risque extérieur tels la pollution et la chaleur.

Le calcul de la cuve est étroitement lié au calcul thermique du transformateur, elle doit présenter une grande surface d'échange avec le milieu extérieur.

**VI.2- Paramètres géométriques : [6],[4]****VI.2.1- Longueur de la cuve L:**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$L = 2.E_C + D_{ex} + 2.x \quad \text{VI.1}$$

$x$  : Distance d'isolation de l'enroulement par rapport à la cuve.

Pour  $U= 30$  kV, on prend  $x = 40$  mm.

$$L = 2 \times 321 + 306.4 + 2 \times 40$$

$$L = 1028.4 \text{ mm}$$

On prend  $L = 1030$  mm

**VI.1.2- Largeur de la cuve  $L_c$ :**

$$L_c = D_{ex1} + 2.x + y \quad \text{VI.2}$$

Avec  $y$  : distance entre la cuve et les prises.

$$L_c = 306,4 + 2 \times 40 + 13$$

$$L_c = 400 \text{ mm}$$

**VI.1.3- Hauteur de la cuve :**

$$H_{cv} = H_n + F_{sco} + d \quad \text{VI.3}$$

$F_{sco}$  : Espace pour le branchement.

$H_n$  : Hauteur du noyau.

$$H_n = H_m + 2B_{s1} + 2d \quad \text{VI.4}$$

$d$  : largeur de la cale d'appui.

$$H_n = 346 + 2 \times 180 + 2 \times 30$$

$$H_n = 766 \text{ mm}$$

$$H_{cv} = 766 + 205 + 30$$

$$H_{cv} = 1001 \text{ mm}$$

### VI.3- Dimensionnements des ondulations : [6],[4]

Pour un meilleur dégagement de la chaleur, il faut que les ondulations dépassent le niveau des bobines vers le bas.

D'après les calculs imposés par la cuve, on a fixé la hauteur des ondulations à 700 mm tout le long des quatre faces de la cuve.

#### Température du cuivre côté secondaire

$\theta_{moy2/H} = 11.4 \text{ }^\circ\text{C}$  : L'élévation moyenne de la température du cuivre par apport à l'huile.

#### Température du cuivre côté primaire

$\theta_{moy1/H} = 9.42 \text{ }^\circ\text{C}$  : L'élévation moyenne de la température du cuivre par apport à l'huile.

La température finale moyenne du cuivre par rapport à une température ambiante de  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  est de  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$\theta_{f moy cu} = 105 \text{ }^\circ\text{C}$  : Température finale moyenne du cuivre.

$\theta_{f max cu} = 105 + 10 = 115 \text{ }^\circ\text{C}$  : Température finale maximale du cuivre.

Nous donnons ci-dessous (figure VI.1), un diagramme des températures atteintes dans le cuivre, durant les phases de fonctionnement du transformateur.

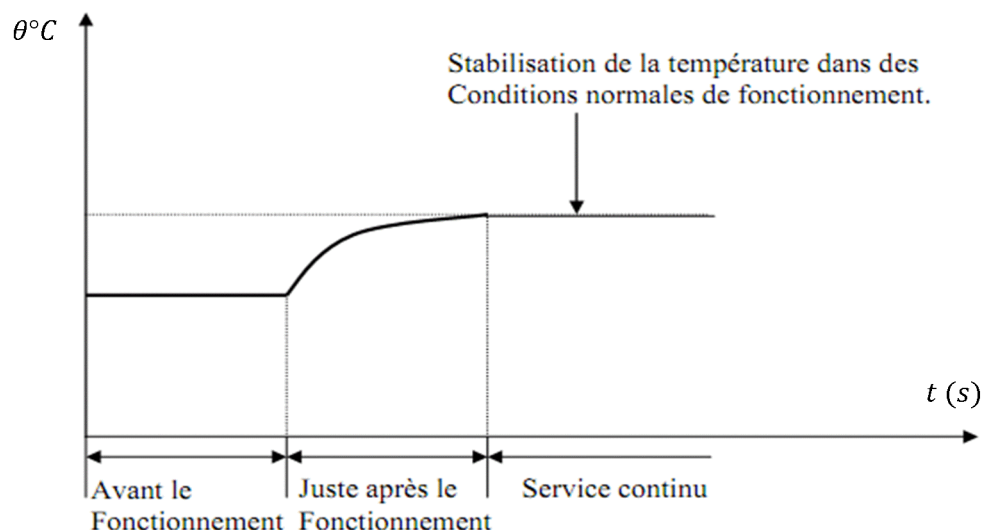


Figure VI.1 : Courbes des différentes températures des conducteurs en cuivre.

**Température de l'huile :**

Pour l'huile, il faut atteindre une élévation maximale de 60°C, donc une température finale de 100°C.

$$\theta_{maxH} = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_{moyH} = \frac{60}{1.2} = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

**VI.3.1- Calcul de l'élévation moyenne de température de l'huile :****Côté secondaire :**

$$\theta_{2moyH} = \theta_{moy\ cu} - \theta_{moy2/H} \quad \text{VI.5}$$

$\theta_{moy\ cu}$  : Température moyenne du cuivre.

$$\theta_{2moyH} = 65 - 21.21$$

$$\theta_{2moyH} = 43.79 \text{ } ^\circ\text{C}$$

**Côté primaire :**

$$\theta_{1moyH} = \theta_{moy\ cu} - \theta_{moy1/H} \quad \text{VI.6}$$

$$\theta_{2moyH} = 65 - 19.48$$

$$\theta_{2moyH} = 45.52 \text{ } ^\circ\text{C}$$

D'où les élévations maximales de température de l'huile côtés haute et basse tension :

**Côté secondaire :**

$$\theta_{2\ max\ H} = \theta_{2moyH} \times 1.2 \quad \text{VI.7}$$

$$\theta_{2\ max\ H} = 43,79 \times 1.2$$

$$\theta_{2\ max\ H} = 52.54 \text{ } ^\circ\text{C}$$

**Côté primaire :**

$$\theta_{1\ max\ H} = \theta_{1moyH} \times 1.2$$

$$\theta_{1\ max\ H} = 45,52 \times 1.2$$

$$\theta_{1\ max\ H} = 54.62 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Pour déterminer le nombre d'ondulations, on doit calculer les pertes à dissiper par la cuve au niveau des parties fonctionnelles, sa valeur est donnée par la formule suivante :

$$P_{55} = (P_0 + 1.06 \cdot P_{CC}) \times m \quad \text{VI.8}$$

$P_{55}$  : pertes à dissiper.

$m$  : facteur de dissipation.

Comme il faut dimensionner une cuve qui va dissiper les pertes  $P_{55}$  et voir plus pour des raisons de sécurité et de durée de vie du transformateur. On prend une élévation de température maximale de l'huile  $\theta_{\max H} = 54.62 \text{ }^\circ\text{C}$ , donc une élévation moyenne de température d'huile.

$$\theta_{\text{moy } H} = \frac{\theta_{\max H}}{1.2} \quad \text{VI.9}$$

$$\theta_{\text{moy } H} = \frac{54.62}{1.2}$$

$$\theta_{\text{moy } H} = 45.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$m = \left( \frac{55}{\theta_{\max H}} \right)^{\frac{1}{0.7}} \quad \text{VI.10}$$

$$m = 1.01$$

$$P_{55} = (971.93 + 1.06 \times 5905) \times 1.01$$

$$P_{55} = 7303.5 \text{ kW}$$

### VI.3.2- Détermination du nombre d'ondulations :

$L = 1030 \text{ mm}$  (longueur de la cuve).

$L_c = 400 \text{ mm}$  (largeur de la cuve).

#### a- Côté largeur de la cuve :

$$L_c = n_2 \cdot 40 + 2e_{w2} \quad \text{VI.11}$$

$n_2$  : Nombre entre axes des ondulations côté largeur.

$$N_2 = n_2 + 1 \quad \text{VI.12}$$

$N_2$  : Nombre d'ondulations côté largeur.

$$n_2 = \frac{L_c - 2e_{w2}}{40} \quad \text{VI.13}$$

On prend  $e_{w2} = 20 \text{ mm}$ .

$$n_2 = \frac{400 - (2 \times 20)}{40}$$

$$n_2 = 9$$

$$N_2 = n_2 + 1$$

$$N_2 = 10$$

Le nombre d'ondulation côté largeur égal à 10.

Correction de  $e_{w2}$  :

$$e_{w2} = \frac{L_c - n_2 \cdot 40}{2} \quad \text{VI.14}$$

$$e_{w2} = \frac{400 - (9 \times 40)}{2}$$

$$\mathbf{e_{w2} = 20 \text{ mm}}$$

**b- Côté longueur de la cuve :**

$$L = n_1 \cdot 40 + 2e_{w1} \quad \text{VI.15}$$

$n_1$  : Nombre entre axes des ondulations côté longueur.

$$N_1 = n_1 + 1 \quad \text{VI.16}$$

$N_1$  : Nombre d'ondulations côté longueur.

$$n_1 = \frac{L - 2e_{w2}}{40} \quad \text{VI.17}$$

On prend  $e_{w1} = 20 \text{ mm}$ .

$$n_1 = \frac{1030 - (2 \times 20)}{40}$$

$$\mathbf{n_1 = 25}$$

$$N_1 = n_1 + 1 \quad \text{VI.18}$$

$$\mathbf{N_1 = 26}$$

Le nombre d'ondulations côté largeur est égal à 26.

**Correction de  $e_{w1}$  :**

$$e_{w1} = \frac{L - n_1 \cdot 40}{2} \quad \text{VI.19}$$

$$e_{w1} = \frac{1030 - (25 \times 40)}{2}$$

$$\mathbf{e_{w1} = 15 \text{ mm}}$$

Le nombre total d'ondulations :

$$N = 2(N_1 + N_2) \quad \text{VI.20}$$

$$\mathbf{N = 72}$$

#### VI.4- Pertes dissipées par la cuve et le couvercle :[4]

##### VI.4.1- Pertes dissipées par la cuve :

**Côté longueur de la cuve :**

A partir du tableau VI.1, on choisit les dimensions suivantes des ondulations :

La profondeur d'ondulation :  $t_w = 200 \text{ mm}$

La hauteur d'ondulation :  $B_w = 700 \text{ mm}$

Les pertes dissipées par ondulation :  $P_{w1} = 104 \text{ W}$

Les pertes totales dissipées par toutes les ondulations côté longueur sont :

$$\begin{aligned} P'_{w1} &= 2 \cdot N_1 \cdot P_{w1} && \text{VI.21} \\ P'_{w1} &= 2 \times 26 \times 104 \\ P'_{w1} &= \mathbf{5408 \text{ W}} \end{aligned}$$

Côté largeur de la cuve :

La profondeur d'ondulation :  $t_w = 200 \text{ mm}$

La hauteur d'ondulation :  $B_w = 700 \text{ mm}$

Les pertes dissipées par ondulation :  $P_{w2} = 104 \text{ W}$

Les pertes totales dissipées par toutes les ondulations côté largeur sont :

$$\begin{aligned} P'_{w2} &= 2 \cdot N_2 \cdot P_{w2} && \text{VI.22} \\ P'_{w2} &= 2 \times 10 \times 104 \\ P'_{w2} &= \mathbf{2080 \text{ W}} \end{aligned}$$

Les pertes totales dissipées par toutes les ondulations sont :

$$\begin{aligned} P_{wt} &= P'_{w1} + P'_{w2} && \text{VI.23} \\ P_{wt} &= \mathbf{7488 \text{ W}} \end{aligned}$$

Le tableau VI.1 représente les caractéristiques des ondulations de la cuve du transformateur.

Tableau VI.1. Caractéristiques des ondulations de la cuve.

$B_w$ (mm)	$t_w$ (mm)	50	100	125	160	200	250	280	320
500	$P_w$ (W)	34	51	59	69	80	93		
	$G_w$ (kg)	0.71	1.2	1.47	1.80	2.26	2.66		
	$V_w$ (dm <sup>3</sup> )	0.19	0.39	0.49	0.63	0.79	1.00		
600	$P_w$ (W)	40	59	68	79	92	108	116	127
	$G_w$ (kg)	0.84	1.43	1.73	2.61	2.64	3.20	3.55	4.02
	$V_w$ (dm <sup>3</sup> )	0.23	0.47	0.59	0.76	0.95	1.19	1.34	1.53
700	$P_w$ (W)	45	67	76	90	104	122	131	143
	$G_w$ (kg)	0.98	1.66	2.01	2.49	3.04	3.72	4.14	4.69
	$V_w$ (dm <sup>3</sup> )	0.27	0.55	0.69	0.89	1.11	1.39	2.01	1.78
800	$P_w$ (W)	50	74	85	99	115	134	145	159
	$G_w$ (kg)	1.11	1.90	2.29	2.84	3.74	4.25	4.72	5.35
	$V_w$ (dm <sup>3</sup> )	0.31	0.63	0.79	1.01	1.22	1.59	1.78	2.55
900	$P_w$ (W)	55	81	93	109	126	147	159	174
	$G_w$ (kg)	1.24	2.13	2.57	3.14	3.87	4.78	5.31	6.01
	$V_w$ (dm <sup>3</sup> )	0.35	0.71	0.89	1.14	1.43	1.79	2.01	2.29
1000	$P_w$ (W)	60	88	101	118	137	160	172	189
	$G_w$ (kg)	1.38	2.36	2.85	3.54	4.32	5.30	5.89	6.68
	$V_w$ (dm <sup>3</sup> )	0.39	0.79	0.99	1.27	1.59	1.99	2.23	2.25
1200	$P_w$ (W)	70	102	118	137	148	160	187	204
	$G_w$ (kg)	1.66	2.85	3.45	4.28	5.23	6.41	7.13	8.08
	$V_w$ (dm <sup>3</sup> )	0.47	0.95	1.20	1.55	1.92	2.40	2.69	2.92

**VI.4.2- Pertes dissipées par le couvercle :**

Les pertes dissipées par le couvercle (figure VI.2) sont données par la formule suivante :

$$P_c = 700.S \quad \text{VI.24}$$

Calcul de la surface de dissipation :

$$S = (L + 2B_p)(L_c + 2B_p) \text{ [m}^2\text{]} \quad \text{VI.25}$$

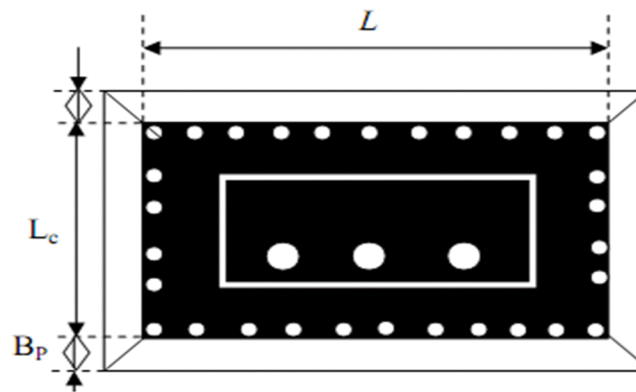


Figure VI.2. Le couvercle

La valeur de  $2B_p$  en fonction de la gamme des puissances apparentes est donnée par le tableau VI.2.

Tableau VI.2. Valeurs de  $2B_p$  utilisé dans le calcul de la surface de dissipation du couvercle.

$S_n$ (kVA)	$\leq 250$	350 à 1600
$2B_p$ (m)	0.09	0.13

$$S = (1.03 + 0.13)(0.4 + 0.13)$$

$$S = 0.615 \text{ m}^2$$

$$P_c = 700 \times 0.615$$

$$P_c = 430.5 \text{ W}$$

Les pertes dissipées par la cuve et le couvercle valent :

$$P = P_c + P_{wt} \quad \text{VI.26}$$

$$P = 430.5 + 7488$$

$$P = 7918.5 \text{ W}$$

Les pertes dissipées par la cuve et le couvercle sont supérieures aux pertes à dissiper, ce qui garantit un bon fonctionnement de l'appareil.

# CONCLUSION GENERALE

Notre projet de fin d'Etudes s'est déroulé au sein de l'Unité Transformateurs de l'Entreprise Electro-Industries d'Azazga. Après avoir suivi les différents protocoles de fabrication des différentes gammes de transformateurs de puissance respirants fabriqués par l'entreprise, notre travail a été orienté vers l'étude d'un transformateur hermétique. Nous avons ainsi procédé à l'étude du dimensionnement d'un transformateur de type 400 kVA - 30 kV/400 V.

Le stage réalisé au sein de l'entreprise nous a permis de consolider nos connaissances théoriques acquises dans le domaine des machines électriques statiques. Ce stage nous a également aidé à saisir les difficultés rencontrées lors de la concrétisation d'une étude théorique

Les résultats de notre dimensionnement sont satisfaisants et répondent bien aux exigences du cahier des charges. Pour la partie thermique, les échauffements calculés ne dépassent pas les valeurs limites, ce qui confirme le bon choix effectué au niveau du calcul électromagnétique, du dimensionnement du circuit magnétique et des enroulements.

## **Bibliographie**

[1] **BERNARD HOCHART**

« Transformateur de puissance ».

[2] **THEODOREWILDI et GILBERT SYBILLE**

« 4<sup>e</sup> édition, Paris 2005 »

[3] **LOUNIS AZIZ et SEGGAR LYES**

« Impact du changement de l'épaisseur de la tôle magnétique sur le dimensionnement d'un transformateur ».

Mémoire master 2 UMMTO, promotion 2013.

[4] **A. BOUDISSA et B. AKLIOUT.**

« étude et réalisation d'un transformateur triphasé à 3 enroulements de puissance 1250 kVA ».

Mémoire d'ingénieur UMMTO, promotion 2001.

[5] **BELKACEMI LAMIA et BOUABDELLAH DEHBIA.**

« Influence des résistances des enroulements du transformateur sur les surtensions ».

Mémoire d'ingénieur UMMTO, promotion 2009.

[6] **DJ. AMIRAT et O. MANSERI**

« Étude du fonctionnement et calcul d'un transformateur à 3 enroulements de puissance 1250 kVA. »

Mémoire d'ingénieur UMMTO, promotion 2009.

[7] **MADJID MEZIANI**

« Contribution à la modélisation analytico-numérique des transformateurs de puissance »

Mémoire magister UMMTO, 2011.

[8] **HADJOU MOUATEZ**

« Étude et réalisation d'un transformateur triphasé immergé dans l'huile »

Mémoire d'ingénieur, promotion 2001.

[9] **Documentation d'Electro-Industries.**

[10] **MEZARI NAOUEL**

« Diagnostic des transformateurs de puissance ».

[11] **BELKACEMI DJAMEL**

« Étude des caractéristiques des matériaux isolants pour transformateur »

Mémoire de magister UMMTO, 2012.