

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI 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

AZOUAOU SADI

SYLIA SI FODIL

Thème

Optimisation de la construction d'un transformateur de puissance triphasé moyenne tension-moyenne tension fabriqué par Electro-Industries.

Mémoire soutenu publiquement le ...10.../...10.../2015..... devant le jury composé de :

M Mohamed IMACHE

Maître-Assistant A, UMMTO, Président

Mme Ferroudja BITAM-MEGHERBI

Professeur, UMMTO, Encadreur

Mme Karima CHAOUCHI

Ingénieur Chef de Service, Electro-Industries, Co-Encadreur

Mlle Rahma KACHENOURA

Maître de Conférences B, UMMTO, Examineur

M M'hand MEKIOUS

Maître-Assistant A, UMMTO, Examineur

Remerciements

Nous adressons nos remerciements à Monsieur Djamal Belkacemi, Directeur de l'unité transformateurs au sein de l'entreprise Electro-Industries pour nous avoir permis de réaliser notre stage au sein de l'entreprise.

Nous remercions vivement madame K. Chaouchi pour la proposition du thème, l'encadrement et le suivi permanent au sein de l'entreprise Electro-Industries.

Aussi nous exprimons notre gratitude à madame : F. Bitam-Megherbi, professeur au département d'électrotechnique, de nous avoir aidés par ses conseils et ses encouragements durant toute les étapes de réalisation de ce travail.

Nous remercions également tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail :

Nos profonds remerciements à l'ensemble des enseignants qui ont participé à notre formation.

Nous remercions également l'ensemble des travailleurs de l'entreprise Electro-Industries pour leurs précieux conseils. Nous remercions particulièrement le personnel du bureau d'étude du département transformateurs.

Enfin nous remercions toute personne qui a participé, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

Je dédie le présent mémoire à :

Mes parents qui sont la source de mon succès.

Ma famille de près et de loin.

*Mon unique, adorable frère **KOCEILA**.*

Ma belle famille.

*En particulier mon mari **IDIR** pour sa compréhension.*

*Tous mes amis (es). En particulier mon ami et binôme **Azouaou**.*

Mes collègues de promotion (ELECTROTHERMIQUE -INDUSTRIELLE).

Syha

Dédicaces

Je dédie le présent mémoire à :

- Mes chers parents qui m'ont toujours soutenu, encouragé et aidé ;
- Mes deux frères « **Koceila, Syphax** » ;
- Ma chère fiancée **Karima** ;
- Mes deux grand-mères ;
- Mes oncles et mes tantes ;
- Mes cousins, cousines et toute la famille ;
- Tous mes amis(es) .En particulier ma collègue de travail **Sylia** ;
- A la mémoire de mes grands parents ;

AZOUAOU



Sommaire



Sommaire

Introduction générale :	1
 Chapitre 1 : Généralités sur les transformateurs de puissance.	
1-1 : Introduction :	2
1-2 : Définition :	2
1-3 : Principe de fonctionnement :	2
1-4 : Constitution générale :	3
1-4-1 : La partie active :	3
a- Circuit magnétique :	3
b- Le circuit électrique:	5
1-4-2 : La partie constitutive :	7
a- La cuve :	7
b- Le couvercle :	8
c- Les traversées :	8
d- Le conservateur d'huile :	9
e- Le liquide diélectrique :	9
1-5 : Les couplages :	9
1-5-1 : Mode du couplage :	9
a- Couplage étoile :	9
b- Couplage triangle :	10
c- Couplage zig-zag :	10
1-5-2 : Choix du couplage :	10
1-6 : Les différents types de transformateurs :	11
1-7 : Indice horaire et rapport de transformation :	11
1-7-1 : Indice horaire :	11
1-7-2 : Rapport de transformation :	12
1-8 : Pertes dans le transformateur :	12
1-8-1 : Pertes fer :	12
a- Pertes par hystérésis :	12
b- Pertes par courants de Foucault :	13
1-8-2 : Les Pertes Joule:	13
1-8-3 : Autres pertes :	13

Sommaire

1-9 : Les contraintes:	14
1-9-1 : les Surtensions:	14
1-9-2 : Les court-circuits :	14
1-9-3: Les Surcharges:	15
1-9-4: Les décharges partielles :	16
1-10 : Protection des transformateurs:	17
1-10-1: Relais Buchholz :	17
1-10-2 : Thermomètre :	17
1-10-3 : Les éclateurs :	18
1-10-4 : L'Assécher d'air :	18
1-10-5 : Soupape de sécurité :	18
1-11 : Schéma global d'un transformateur de puissance :	18
1-12 : Echauffement et refroidissement des transformateurs :	19
1-12-1 : Echauffement :	19
1-12-2 : Refroidissement :	20
1-13 : Régimes de fonctionnement :	20
1-13-1 : Régime de surcharge :	20
1-13-2 : Régime déséquilibré :	20
1-13-3 : Régime transitoire :	20

CHAPITRE 2 : Opérations de fabrication d'un transformateur de puissance.

2.1 : Introduction :	21
2.2 : Fabrication mécanique :	21
La réalisation :	21
a- La cuve :	21
b- Le couvercle :	23
c- Les tôles de serrage :	24
d- Les sièges et les boulons de serrage :	24
2.3 : Fabrication électrique (bobinage) :	25
2.3.1 : Enroulement secondaire (BT) :	2
2.3.2 : Enroulement primaire (HT) :	26
2.4 : Fabrication du noyau (circuit magnétique):	28

Sommaire

2.5 : Montage :.....	30
2.5.1 : Montage de la partie active :.....	31
2.5.2 : Branchement de la basse tension et de la haute tension :.....	31
a- Branchement de la basse tension :.....	31
b- Branchement de la haute tension :.....	31
2.5.3 : Soudage des connexions :.....	31
2.6 : Séchage :.....	31
2.7 : Montage et accessoires sur le couvercle :.....	32
2.8 : Encuvage :.....	32
2.9 : Remplissage d'huile :.....	33
2.10 : vérification du transformateur :.....	34
2.11 : Les retouches finales :.....	34

CHAPITRE 3 : Calculs électromagnétiques.

3-1 : introduction :.....	35
3-2 : Calculs préliminaires des dimensions principales :.....	35
3-2-1 : Puissance apparente par colonne :.....	36
3-2-2 : Tension dans les enroulements :.....	36
3-2-2-1 : Enroulement primaire :.....	36
3-2-2-2 : Enroulement secondaire :.....	36
3-2-3: Courants dans les enroulements :.....	37
3-2-3-1 : Courant dans l'enroulement primaire :.....	37
3-2-3-2: Courant dans l'enroulement secondaire :.....	37
3-2-4: Tension de court circuit :.....	37
3-2-5 : Diamètre et section de la colonne :.....	38
3-2-5-1 : Epaisseur rapporté du canal a_r :.....	38
3-2-5-2 : Coefficient de sveltesse :.....	39
3-2-5-3: Coefficient de ROGOWSKI K_R :.....	40
3-2-5-4 : Facteur d'utilisation de la section du fer :.....	40
3-2-5-5 : Induction de crête B_c :.....	40
3-2-5-6 : Perméabilité magnétique du vide μ_0 :.....	41

Sommaire

3-2-5-7 : Fréquence industrielle f :.....	41
3-2-6: Diamètre du canal de fuite D_{12} :.....	41
3-2-7 : Hauteur approximative des enroulements :.....	41
3-3:Calcul des enroulements:.....	42
3-3-1: Tension d'une spire :.....	42
3-3-2: Nombre de spires :.....	42
3-3-2-1 : Enroulement secondaire :.....	42
3-3-2-2 : Recalcul de la tension de spire :.....	42
3-3-2-3: Enroulement primaire:.....	42
3-3-2-4 : Recalcul de l'induction crête :.....	43
3-3-2-5 : Calcul du nombre de spires de réglage :.....	43
3-3-3 : Section des conducteurs :.....	43
3-3-3-1 : Calcul de la densité moyenne du courant :.....	44
3-3-3-2 : Section des conducteurs du secondaire :.....	44
3-3-3-3 : Section du conducteur du primaire :.....	46
3-3-4 : Hauteur des enroulements :.....	47
3-3-4-1 : Hauteur magnétique du bobinage secondaire :.....	47
3-3-4-2 : Calcul de la hauteur du bobinage primaire :.....	48
3-3-4-3 : hauteur du montage de bobines :.....	49
3-3-4-4 : Dimensionnement de la cale de progression :.....	49
3-3-5: Dimensionnement radial des enroulements:.....	50
3-3-5-1: Diamètre intérieur de la bobine basse tension :.....	50
3-3-5-2 : Diamètre extérieure de la bobine basse tension :.....	50
3-3-5-3 : Diamètre intérieure de la bobine haute tension :.....	50
3-3-5-4 : Diamètre extérieur de la bobine haute tension :.....	50
3-4: Dimensionnement du circuit magnétique :.....	51
3-4-1 : Nombre et dimensions des gradins :.....	51
3-4-2: Longueur de la fenêtre:	52
3-4-3 : Hauteur de la fenêtre :.....	53
3-4-4 : Hauteur du noyau :.....	53
3-4-5 : Longueur entre axes des colonnes :.....	53
3-4-6 : Longueur du noyau :.....	53
3-4-7 : Section de la culasse :.....	54

Sommaire

CHAPITRE 4 : Calculs des pertes, rendement et chute de tension.

4-1 : Introduction :.....	56
4-2 : Pertes dans le transformateur :.....	56
4-2-1 : Pertes dans le fer (à vide):.....	56
a- : Poids du noyau :.....	56
b- : Pertes dans le noyau P'_0 :.....	58
c- : Pertes supplémentaires :.....	58
4-2-2 : Pertes dans le cuivre (pertes Joule) :.....	59
4-2-2-1 : Enroulement secondaire :.....	59
a- Diamètre moyen de la spire D_{m2} :.....	59
b- Longueur moyenne de la spire L_{m2} :.....	59
c- Longueur totale d'un enroulement L_2 :.....	59
d- Résistance d'un enroulement R_2 :.....	60
e- Poids d'un enroulement G_{c2} :.....	60
f- Pertes Joule côté secondaire :.....	60
g- Pertes supplémentaires côté secondaire :.....	60
h- Pertes totales en charge côté secondaire P_{CC2} :.....	63
4-2-2-2 : Enroulement primaire :.....	63
a- Diamètre moyen de la spire D_{m1} :.....	63
b- Longueur moyenne de la spire L_{m1} :.....	63
c- Longueur totale d'un enroulement L_1 :.....	64
d- Résistance d'un enroulement R_1 :.....	64
e- Poids d'un enroulement G_{c1} :.....	64
f- Pertes Joule coté primaire :.....	64
g- Pertes supplémentaires côté primaire :.....	64
h- Pertes totales en charge côté primaire P_{CC1} :.....	66
4-2-2-3 : Pertes joules totales P_{cc} :.....	66
4-3 : Calcul définitif de la tension de court-circuit U_{cc} :.....	66

Sommaire

4-4 : Calcul du rendement :.....	67
4- 5 : Calcul de la chute de tension ΔU :.....	68
a- Cas d'une charge résistive : $\cos\varphi_2 = 1$:.....	68
b- Cas d'une charge inductive : $\cos\varphi = 0.8$ et $\sin\varphi = 0.6$:.....	68
c- Cas d'une charge capacitive : $\cos\varphi = 1$ et $\sin\varphi = -0.6$:.....	68
4-6 : Calcul du courant à vide :.....	69

CHAPITRE 5 : Calculs thermiques.

5-1 : Introduction :.....	70
5-2 : Echauffement du circuit magnétique :.....	70
5-2-1 : Echauffement maximal du circuit magnétique par rapport à la surface dans la direction longitudinale :.....	70
5-2-2: Echauffement maximal du circuit magnétique par rapport à la surface dans la direction transversale :.....	71
5-2-3 : Différence de température entre la surface du circuit magnétique et l'huile dans la direction longitudinale :.....	71
5-2-4 : Différence de température entre la surface du circuit magnétique et l'huile dans la direction transversale :.....	72
5-2-5 : Echauffement maximal du circuit magnétique dans la direction longitudinale :.....	72
5-2-6 : Echauffement maximal du circuit magnétique dans la direction transversale :.....	72
5-3 : Echauffement dans les enroulements :.....	72
5-3-1 : Echauffement moyen de l'enroulement secondaire par rapport à l'huile :.....	72
a- Calcul de la surface intérieure de l'enroulement en contact avec l'huile :.....	73
b- Calcul de la surface extérieure de l'enroulement en contact avec l'huile :.....	73
c- Calcul de la conductivité résultante de l'enroulement :.....	74
d- Calcul des résistances thermiques de l'isolation périphérique :.....	74
e- Distance à laquelle la température est maximale :.....	75
f- Calcul des flux thermiques :.....	75
g- Calcul des résistances thermiques :.....	76

Sommaire

h-	Calcul de la température maximale de l'enroulement :.....	76
i-	Calcul des températures de l'enroulement :.....	77
5-3-2 : Echauffement moyen dans l'enroulement primaire par rapport à l'huile :.....		
77		
a-	Calcul de la surface intérieure de l'enroulement en contact avec l'huile :.....	
b-	Calcul de la surface extérieure de l'enroulement en contact avec l'huile :.....	78
c-	Calcul de la conductivité résultante de l'enroulement :.....	79
d-	Calcul des résistances thermiques de l'isolation périphérique :.....	79
e-	Distance à laquelle la température est maximale :.....	79
f-	Calcul des flux thermiques :.....	80
g-	Calcul des résistances thermiques :.....	80
h-	Calcul de la température maximale de l'enroulement :.....	81
i-	Calcul des températures de l'enroulement :.....	81

CHAPITRE 6 : Dimensionnement de la cuve d'un transformateur de puissance.

6-1 :	Introduction :.....	84
6-2 :	Paramètres géométriques :.....	84
6-2-1 :	Longueur de la cuve L :.....	84
6-2-2 :	Largueur de la cuve :.....	84
6-2-3 :	Hauteur de la cuve :.....	84
6-3 :	Choix des démentions des ondulations :.....	85
6-3-1:	Calcul de l'élévation moyenne de la température de l'huile :.....	86
6-3-2 :	Détermination du nombre d'ondulations :.....	87
a-	côté longueur de la cuve :.....	87
b-	Côté largeur de la cuve :.....	88
6-4 :	Pertes dissipées par la cuve et le couvercle :.....	89
6-4-1 :	Pertes dissipées par la cuve:.....	89
6-4-2 :	Pertes dissipées par le couvercle :.....	90
Conclusion générale :.....		92

Introduction générale



Introduction générale

L'énergie électrique produite par les centrales électriques (hydrauliques, thermiques ou nucléaires) n'est que partiellement utilisée sur les lieux de production.

Il ya donc nécessité de transporter cette énergie vers les centres urbains et les sites industriels.

Le transformateur, par ses différentes facettes d'utilisation, rend possible ce transport économique, et se trouve présent à toutes les étapes d'utilisation de l'énergie électrique, depuis le transport jusqu'à l'utilisation.

Le problème du rendement des transformateurs est d'une grande importance, si l'on tient compte du fait que l'énergie produite dans une centrale est transportée plusieurs fois avant d'arriver aux récepteurs. Pour augmenter ce rendement, il faudra optimiser le transformateur et améliorer sa construction.

Notre étude consiste à optimiser un transformateur de puissance immergé dans l'huile, de puissance apparente 630 kVA, de tensions primaire et secondaire 30 kV/5.7 kV respectivement et qui fonctionne à une température ambiante de 50°C. Ce transformateur fabriqué par l'entreprise Electro-Industries est destiné à l'entreprise NAFTAL.

Avant d'arriver au dimensionnement du transformateur objet de notre étude, nous donnons d'abord des généralités sur les transformateurs de puissance dans le chapitre 1.

Dans le chapitre 2, nous décrivons le processus de fabrication d'un transformateur de puissance.

Notre étude proprement dite démarre au niveau du chapitre 3 dans lequel nous donnons les résultats de nos calculs électromagnétiques.

Le quatrième chapitre est consacré au calcul des chutes de tension et du rendement.

Dans le cinquième chapitre, nous abordons les calculs thermiques liés au transformateur.

Le dernier et sixième chapitre est réservé au dimensionnement de la cuve du transformateur.

Nous terminons notre étude par une conclusion générale où seront donnés les principaux résultats.

Chapitre 1

Généralités sur les transformateurs de puissance



1-1 : 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 des usines et les maisons.

1-2 : Définition :

Le transformateur est une machine statique à induction électromagnétique qui permet de transformer un système de tensions et de courants alternatifs en un ou plusieurs systèmes de tensions et de courants de même fréquence.

Cet appareil comporte deux enroulements, l'un est appelé primaire et l'autre secondaire.

- Le primaire : c'est l'enroulement qui reçoit la puissance active de la source.
- Le secondaire : c'est celui qui restitue la puissance active du primaire.

Ces derniers sont montés sur un circuit magnétique feuilleté. Si la tension d'alimentation appliquée au primaire est plus élevée que celle délivrée par le secondaire, le transformateur fonctionne en abaisseur et dans le cas inverse il fonctionne en élévateur. [1]

1-3 : Principe de fonctionnement : [8]

En vertu de la loi de Faraday, lorsqu'un flux d'induction magnétique variable circule dans le circuit magnétique, il induit dans l'enroulement secondaire une force électromotrice proportionnelle dans le temps aux taux de changement ($d\phi/dt$) et au nombre de spires que comporte cet enroulement. Autrement dit le fonctionnement d'un transformateur est basé sur l'effet électromagnétique de ses enroulements. Les enroulements primaire et secondaire sont couplés magnétiquement grâce au circuit magnétique de faible réluctance.

Lorsque le primaire est alimenté par une source alternative, le courant crée un flux magnétique alternatif qui circule dans le circuit magnétique et son amplitude dépend du nombre de spires du primaire et de la tension appliquée.

La fermeture du secondaire sur une charge provoque la circulation du courant secondaire.

Le noyau magnétique fournit un chemin de canalisation du flux magnétique tel que montré par la figure 1-1.

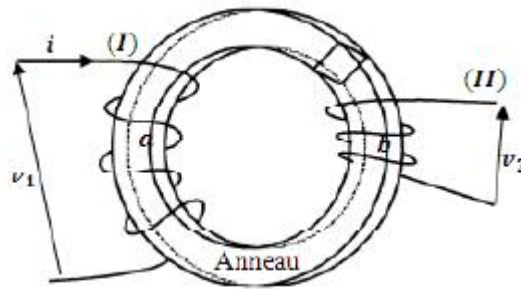


Figure 1-1 : Circuit magnétique et électrique liés.

1-4 : Constitution générale :

Le transformateur est constitué de deux parties essentielles figure 1-2 :

- **La partie active** : elle est destinée à assurer la conversion de l'énergie.
- **La partie constitutive** : elle est destinée à la protection et à la fixation de la première partie.

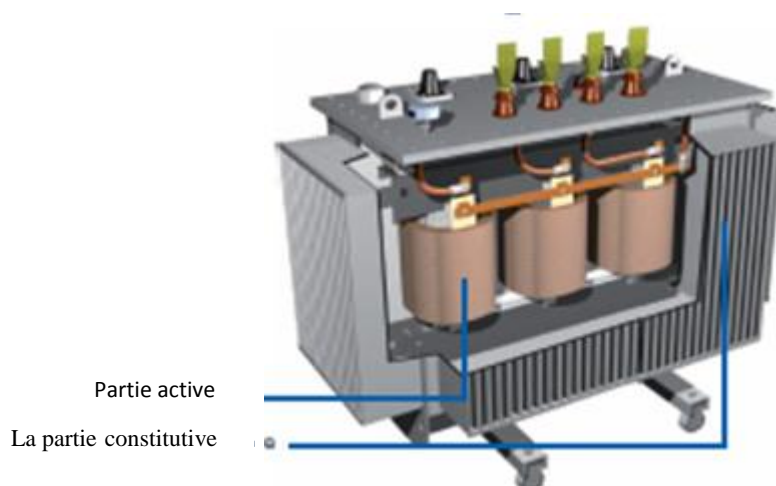


Figure1-2 : Constitutions d'un transformateur triphasé.

1-4-1 : La partie active :

Elle comporte le circuit magnétique et les enroulements.

a- Circuit magnétique :

Le noyau est composé d'un empilage de tôles ferromagnétiques de haute perméabilité et de cristaux orientés, isolées électriquement entre elles. Il doit être conçu de façon à réduire les pertes par courant de Foucault et par hystérésis qui se produisent lors de la variation périodique du flux magnétique. On parvient à résoudre ce problème en prenant des mesures à savoir :

- Emploi d'acier magnétiquement doux ayant une petite surface du cycle d'hystérésis et de faibles pertes par hystérésis ;
- Emploi d'aciers spéciaux présentant, grâce à des additifs, une résistivité élevée ;
- Emploi de tôles dont l'épaisseur est choisie tel que les courants de Foucault soient pratiquement sans effet [3].

Le noyau est destiné à canaliser le flux magnétique produit par l'enroulement primaire vers l'enroulement secondaire et sert de support aux enroulements.

La variation périodique du flux magnétique provoque des pertes d'énergie par courants de Foucault et par hystérésis qui sont néfastes pour le rendement du transformateur.

Le circuit magnétique comporte trois colonnes réunies par deux culasses figure 1-3.

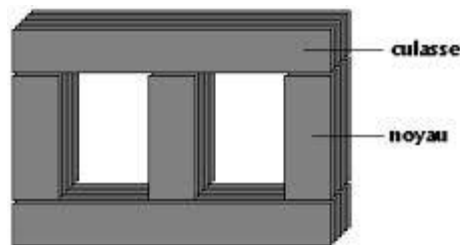


Figure 1-3 : circuit magnétique d'un transformateur triphasé.

Suivant la forme du circuit magnétique, on distingue deux dispositions principales qui sont :

❖ **Type cuirassé :**

Pour ce type de transformateur, le circuit magnétique entoure complètement l'enroulement des deux côtés. La cuve assure le serrage de l'ensemble et le transformateur ainsi constitué est alors assuré d'une excellente rigidité mécanique associée à une grande compacité. Les transformateurs de ce type sont utilisés principalement au sein des réseaux de transport et de répartition, où les surtensions transitoires sont fréquentes. Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobines.

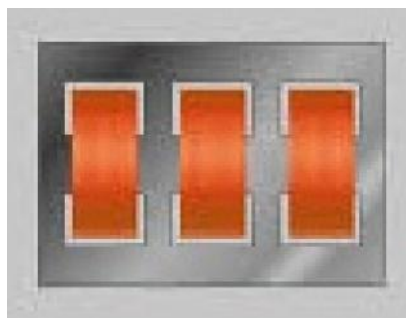


Figure 1-4 : Transformateur type cuirassé.

❖ Type à colonnes :

Le transformateur à colonnes est constitué de deux enroulements concentriques par phase. Ces enroulements sont montés sur le noyau ferromagnétique qui se referme à ses extrémités via des culasses afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique.

Dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique de manière à maximiser le couplage tout en minimisant le volume des conducteurs. Cette disposition plus simple que la précédente est utilisée pour le transformateur à haute tension et les grandes puissances. Les enroulements peuvent être disposés sur un circuit magnétique comportant trois colonnes, dont trois sont bobinées, les autres servent au retour des flux.

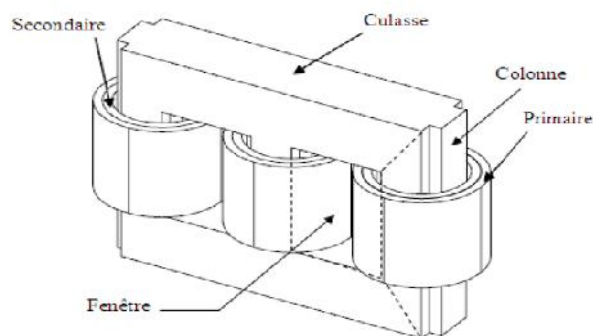


Figure 1-5 : Transformateur à colonnes.

b- Le circuit électrique:

Le matériau constituant les enroulements est généralement en cuivre ou en aluminium de forme circulaire ou rectangulaire. Les enroulements sont isolés entre eux avec du vernis synthétique. Concernant l'isolation entre les colonnes du circuit magnétique, on utilise des tubes écran en presspahn ou en papier doté de bakélite.

❖ L'enroulement primaire :

Il doit avoir une section faible et un nombre de spires grand. Ceci est imposé par la tension élevée et le courant faible à laquelle il est soumis.

❖ L'enroulement secondaire :

Pour cet enroulement, la section du fil doit être importante et le nombre de spires est petit, ce qui correspond au courant fort et la tension moins élevée qui sont délivrés par cet enroulement.

Pour les transformateurs de basse tension et faible puissance, les enroulements primaire et secondaire sont constitués par des bobines en fil de cuivre émaillé, chaque couche étant isolée de la suivante par du papier. Pour les appareils à haute tension et grande puissance, les bobines parfois

fractionnées en galettes, sont constituées par du fil rond ou méplat isolé au carton imprégné, séparées par des isolants tels que fibre, mica,...etc. [3]

La figure 1-6 montre les deux enroulements d'un transformateur.

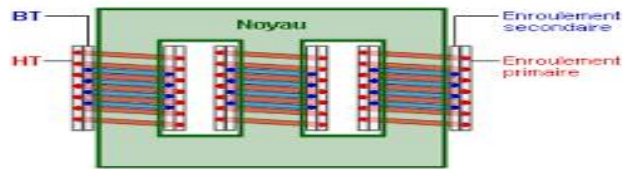


Figure 1-6: les enroulements d'un transformateur.

On distingue trois dispositions principales des bobines sur les noyaux :

❖ Bobinage concentrique simple :

Le bobinage à basse tension est enroulé sur le noyau et après isolement est recouvert par le bobinage haute tension.

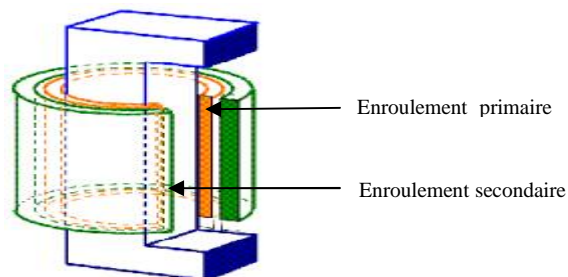


Figure 1-7: Bobinage concentrique simple.

❖ Bobinage concentrique double :

La moitié du bobinage basse tension est enroulée sur le noyau et isolée, puis on enroule le bobinage haute tension et on isole ; enfin on termine par la deuxième moitié du bobinage basse tension. Autrement dit, le bobinage haute tension est en sandwich entre les deux moitiés basse tension.

❖ Bobinage à galette :

Les bobinages haute tension et basse tension sont fractionnés et constitués par des couronnes ou des galettes qui sont en filées alternativement sur les noyaux.

En distribution, les transformateurs sont à bobinage concentrique simple.

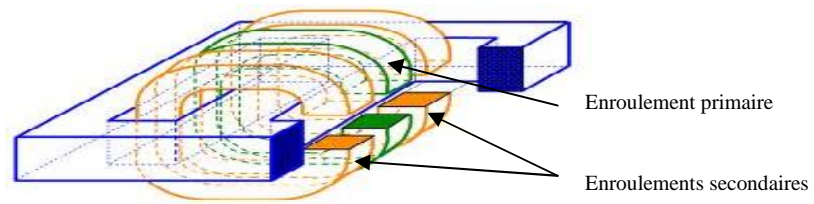


Figure 1-8 : Bobinage à galette.

1-4-2 : La partie constitutive :

Cette partie comporte des éléments mécaniques qui servent à la protection, la fixation et le refroidissement de la partie active du transformateur. Ces éléments sont les suivants :

a- La cuve :

La cuve doit être construite selon le calcul thermique du transformateur, elle doit satisfaire aux exigences suivantes :

- Résistance mécanique et rigidité nécessaire pour toute déformation sous l'effet du poids de la partie active et l'huile qui s'exerce sur elle.
- Elle doit être réalisée avec une bonne étanchéité à l'huile et aussi présenter une grande surface d'échange de chaleur avec le milieu extérieur. Pour cela, on doit prévoir une cuve qui est faite en tôles avec ondulations qui ont une profondeur relative à la chaleur dissipée.

La figure 1-9 montre la cuve d'un transformateur.



Figure 1-9 : cuve d'un transformateur.

b- Le couvercle :

C'est un élément important de la cuve il présente la partie supérieure du transformateur, sur lequel sont disposés plusieurs éléments :

- Borne HT.
- Borne BT.
- Pattes de suspension.
- Trous pour l'emplacement.
- Prise de terre.
- Poches thermomètres.
- Manette de réglage de la tension et dispositifs de fixation des éclateurs.

La figure 1-10 montre le couvercle d'un gros transformateur :

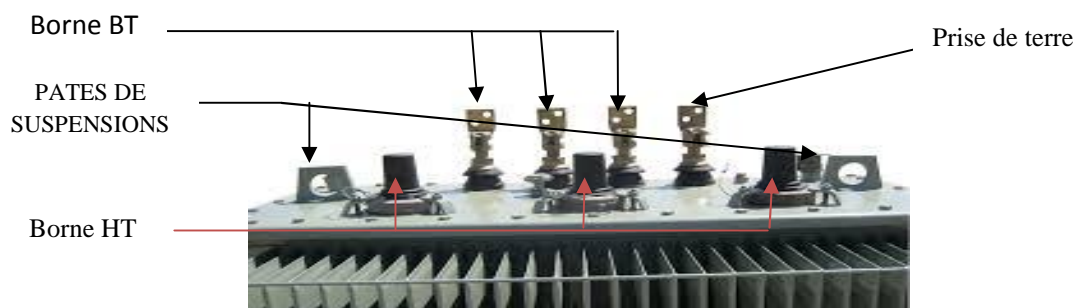


Figure 1-10 : couvercle d'un transformateur.

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 d'autre part. Elles permettent d'avoir une bonne répartition du champ électrique et une fixation étanche et robuste sur le couvercle.

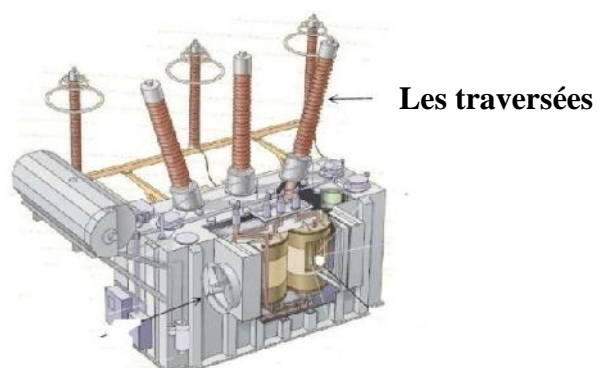


Figure 1-11 : Traversées d'un transformateur triphasé.

d- Le conservateur d'huile :

Il appartient à la partie supérieure du transformateur. Il est placé sur le couvercle à l'aide des éclisses et sur sa face frontale est placé un indicateur d'huile qui est transparent. Sur l'autre face une bride, sur laquelle l'assécheur d'air est fixé, est soudée.

La figure 1-12 montre le conservateur d'huile d'un transformateur.



Figure 1-12 : conservateur d'huile d'un transformateur.

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 a non seulement l'avantage d'une meilleure isolation, mais aussi celui de la facilité de refroidissement par circulation naturelle de l'huile.

1-5 : Les couplages :

1-5-1 : Mode du couplage :

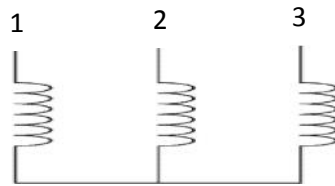
Les enroulements du primaire du transformateur peuvent être connectés soit en étoile (Y), soit en triangle (D).

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

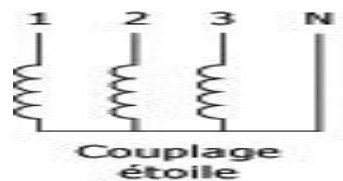
a- Couplage étoile :

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

Couplage étoile sans neutre :

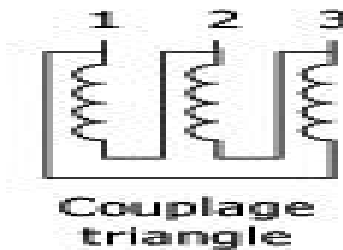


Couplage étoile avec neutre :



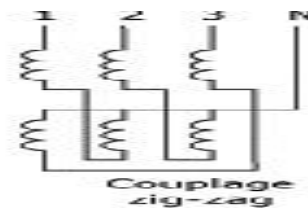
b- Couplage triangle :

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



c- Couplage zig-zag :

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



1-5-2 : Choix du couplage :

On a intérêt à choisir ;

- Un couplage étoile aux 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 adoptera un couplage étoile au secondaire. Ce cas correspond aux transformateurs 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 des transformateurs de distribution utilisés comme élévateurs de tension.
- Couplage étoile zig- zag Yz : c'est un couplage utilisé dans les transformateurs de distribution pour compenser le déséquilibre.

1-6 : Les différents types de transformateurs :

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

Il existe plusieurs types de transformateurs :

- Les transformateurs de puissance destinés au transport et la distribution de l'énergie électrique.
- Les auto-transformateurs destinés au réglage de la tension et à la mise en marche des moteurs à courant alternatif.
- Les transformateurs de mesure de tension et de courant.
- Les transformateurs de puissance spéciaux pour l'alimentation de fours et des postes de soudage.
- Les transformateurs d'isolement qui créent une isolation galvanique entre le primaire et le secondaire. Ces transformateurs servent à assurer la sécurité d'une installation.

1-7 : Indice horaire et rapport de transformation :

1-7-1 : Indice horaire :

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

$$h = \frac{\theta}{\pi/6}$$

On peut déterminer θ comme suit :

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

Figure 1-13 montre la relation entre l'indice horaire et les différents couplages.

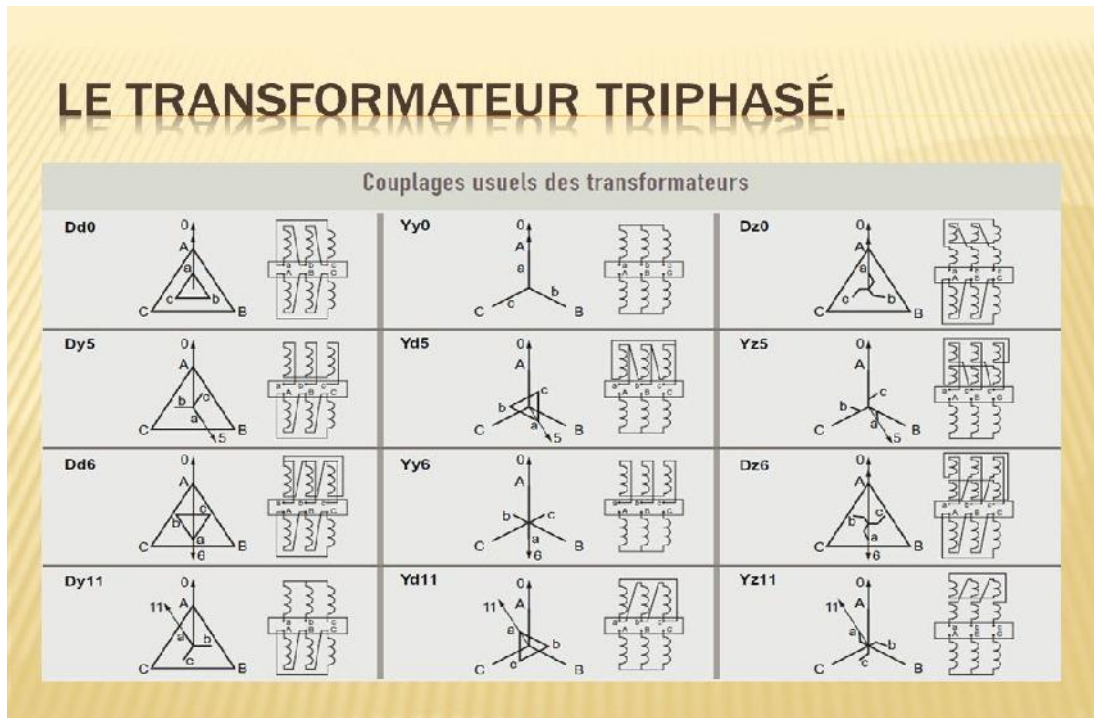


Figure 1-13 : relation entre indice horaire et couplage.

1-7-2 : Rapport de transformation : [2]

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.

1-8 : Pertes dans le transformateur :

1-8-1 : 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 :

Ces pertes sont causées par le champ alternatif qui parcourt le circuit magnétique. Elles sont dues au retard de l'aimantation par rapport au champ magnétique.

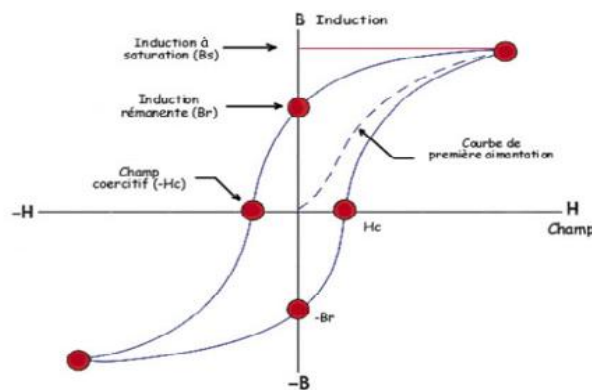


Figure 1-14 : cycle d'hystérésis.

b- Pertes par courants de Foucault :

Les masses métalliques qui se trouvent dans un champ magnétique subissent une variation de ce champ qui crée des courants de Foucault. Ces courants induits causent des échauffements de ces masses.

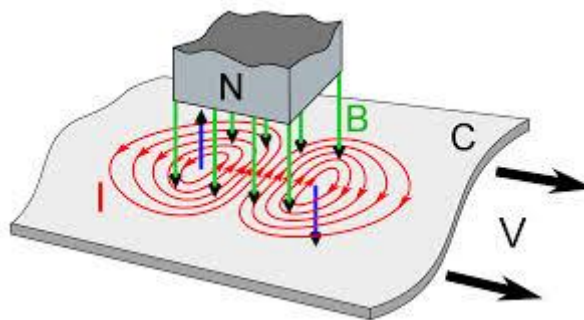


Figure 1-15: schématisation des courants de Foucault.

1-8-2 : Les 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 connections et des pertes par effet pelliculaire.

1-8-3 : Autres pertes : [2] [3].

Malgré que les conducteurs sont isolés par des isolants, il y a de faibles courants qui traversent ces isolants, ce sont généralement des courants négligeables.

1-9 : Les contraintes : [2]

Un réseau électrique doit fournir une énergie avec une meilleure qualité possible. Cette dernière se dégrade avec l'apparition des anomalies dont la durée peut conduire à des arrêts de fonctionnements prolongés.

Nous passerons rapidement en revue dans cette analyse, les défauts que l'on rencontre couramment sur les transformateurs, leurs causes et leurs conséquences.

1-9-1 : les Surtensions :

Les surtensions sont dangereuses dans un réseau de distribution car elles soumettent les isolants à des contraintes qui risquent de les détruire.

Les surtensions peuvent être causées par :

- Contact avec une ligne de plus forte tension.
- Coupure brutale d'une ligne.
- Coup de foudre direct ou indirect.

Dans le cas où la surtension persiste, elle risque d'entraîner des surcharges dangereuses pour les récepteurs et même pour les générateurs.

En cas de claquage de l'isolant, les surtensions ont pour conséquence immédiate un court-circuit même s'il s'agit seulement d'un arc dans l'air. Celui-ci persiste sur les réseaux de tension supérieure à quelques milliers de volts, même après disparition de la surtension.

On a alors le courant de fuite qui ne sera coupé que par isolement de la ligne ou de l'appareil atteint.

1-9-2 : Les court-circuits :

Un court-circuit est la disparition intempestive de l'isolant relatif de deux conducteurs de tensions différentes, sans interposition d'une impédance convenable.

Les court-circuits peuvent être causés par les :

- installations intérieures : frottement- écrasement - rupture de conducteurs - contact avec le conducteur voisin...etc.
- lignes aériennes : Le coup de foudre - balancement de conducteurs - chute de branches...etc.
- lignes souterraines : mouvement de terrain- infiltration d'humidité - coup de pioche...etc.
- postes : avarie d'un appareil - vieillissement, détérioration ou claquage des isolants.

Les conséquences des surintensités sont :

- la chaleur de l'arc ou celle dépensée dans le contact imprévu, peut faire fondre les métaux environnants, carboniser les isolants et même déclencher les incendies.
- les efforts électrodynamiques des courants de court-circuit sont très dangereux, les enroulements des transformateurs sont véritablement secoués. Ils peuvent même causer un décalage de galettes.
- L'échauffement de tous les conducteurs traversés par le courant de court-circuit est très important. Il concentre ses effets sur les points faibles comme les bornes des transformateurs.
- les effets de la chute de tension, s'ils font courir moins de danger au matériel, n'en sont pas moins gênants, la tension devient quasi nulle au voisinage du court-circuit.

1-9-3: Les Surcharges :

Les surcharges sont dues essentiellement à une augmentation de la demande d'énergie, parfois aussi à un dimensionnement incorrect des équipements qui composent les installations électriques.

Les surcharges se caractérisent par des courants supérieurs aux courants maximums admissibles. Si ces courants se maintiennent trop longtemps ils peuvent d'une part endommager les matières isolantes et d'autre part provoquer la rupture des conducteurs par suite de la dégradation de leur résistance mécanique.

Les conséquences des surcharges sont :

Un régime de charge des transformateurs au-delà des valeurs indiquées sur la plaque signalétique a les conséquences suivantes :

- les températures des enroulements, des claquages, des connexions des isolants et de l'huile vont augmenter, et peuvent atteindre des niveaux inacceptables.
- l'induction magnétique du flux de fuite, en dehors du circuit magnétique, augmente et provoque un accroissement de l'échauffement par courants de Foucault dans la partie métallique embrassées par le flux de fuite.
- comme la température varie, les taux d'humidité et la teneur en gaz dans l'isolation et dans l'huile sont modifiés.
- les traversées, les changeurs de prises, les connexions d'extrémités de câble et les transformateurs de courants sont également soumis à des contraintes plus élevées qui réduisent leurs marges de conception et d'application.

Par conséquent il ya un risque de défaillance prématurée lié à l'augmentation des courants et des températures. Ce risque peut être d'un caractère à court terme immédiat ou résulter de l'effet cumulatif du vieillissement thermique de l'isolant du transformateur sur de nombreuses années.

1-9-4: Les décharges partielles :

Les décharges partielles(DP), telles que définies par la norme IEC 60270, sont des décharges disruptives localisées dans une petite partie d'un système d'isolement électrique solide ou liquide, sous l'effet d'une forte contrainte de tension.

Si une décharge partielle ne conduit pas immédiatement à la mise hors service d'un appareil, elle est toutefois préjudiciable dans la mesure où elle conduit à une dégradation des matériaux (en particulier solides) sous l'effet de diverses contraintes :

- Contrainte thermique générée localement par la décharge (par exemple carbonisation du carton d'un transformateur).
- Contrainte chimique due aux produits de dégradation générés par la décharge (par exemple ozone ou acide nitrique).

L'extension de la décharge est limitée soit parce que le champ électrique local n'est pas suffisant pour provoquer sa propagation totale (décharge couronne dans un gaz ou un liquide, par exemple), soit parce que la propagation est bloquée par un isolant dont le champ de claquage est plus élevé (en général un solide).

La détection et la surveillance des décharges partielles sont d'une importance capitale car les phénomènes de décharges partielles précèdent fréquemment le claquage d'un isolant de l'équipement haute tension, pouvant entraîner des pannes dont la réparation est très coûteuses.

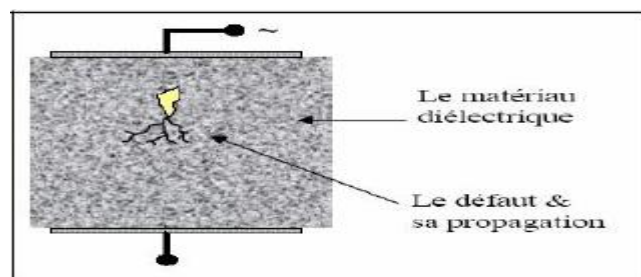


Figure1-16: Décharge partielle dans un diélectrique.

1-10 : Protection des transformateurs : [2].

Le transformateur peut être confronté à de nombreux défauts qui peuvent 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.

1-10-1: Relais Buchholz :

Le relais Buchholz intervient en cas d'une anomalie au niveau du transformateur. Cette dernière se manifeste par un échauffement qui augmente la température de l'huile isolante et qui se décompose en dégageant un gaz. Ce gaz monte dans la cuve vers le relais Buchholz.

Si le dégagement est faible, alors le gaz s'accumule dans la partie supérieure du relais. Ce qui permet la descente du flotteur qui ferme le contact de la première alarme du relais.

Si le dégagement est fort, il y aura une grande pression de gaz dans la cuve, ce qui provoque un déplacement de liquide de la cuve vers le relais, qui cause le basculement du flotteur de la partie inférieure du relais. Ce qui a pour effet la fermeture du contact de la dernière alarme, d'où le déclenchement du disjoncteur.

La figure 1-17 montre le relais Buchholz et son fonctionnement lors de l'accumulation du gaz provoquant l'ouverture du contact d'alarme.

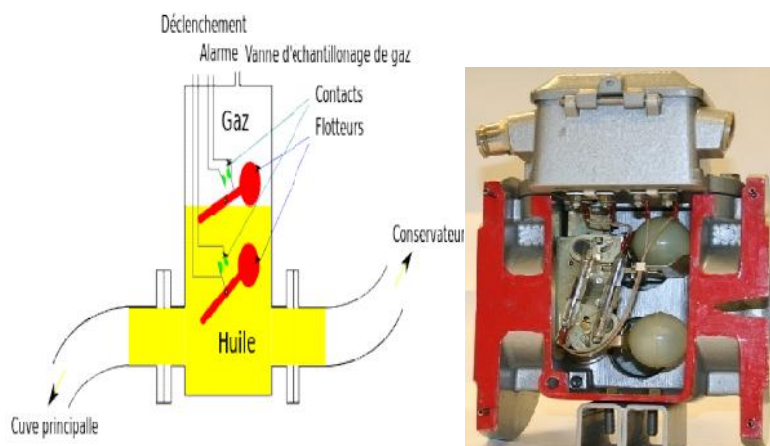


Figure 1-17 : Relais Buchholz et Schéma d'un relais Buchholz après accumulation de gaz provoquant l'ouverture du contact d'alarme.

1-10-2 : 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 du disjoncteur.

1-10-3 : Les éclateurs :

L'éclateur est un dispositif simple, constitué de deux électrodes dans l'air. La limitation de tension à ses bornes est effectuée par l'amorçage de l'intervalle d'air, ce qui permet d'écouler les surtensions vers la terre.



Figure 1-18 : Eclateur.

1-10-4 : L'Assécheur d'air :

C'est un équipement qui absorbe l'air qui afflue vers 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'assécher d'air augmente la sécurité de fonctionnement du transformateur. Le déshydratant est du silicagel de couleur rose.

1-10-5 : Soupape de sécurité : [1].

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.

1-11 : Schéma global d'un transformateur de puissance

La figure 1-19 donne un récapitulatif de l'ensemble des constituants d'un transformateur de puissance.

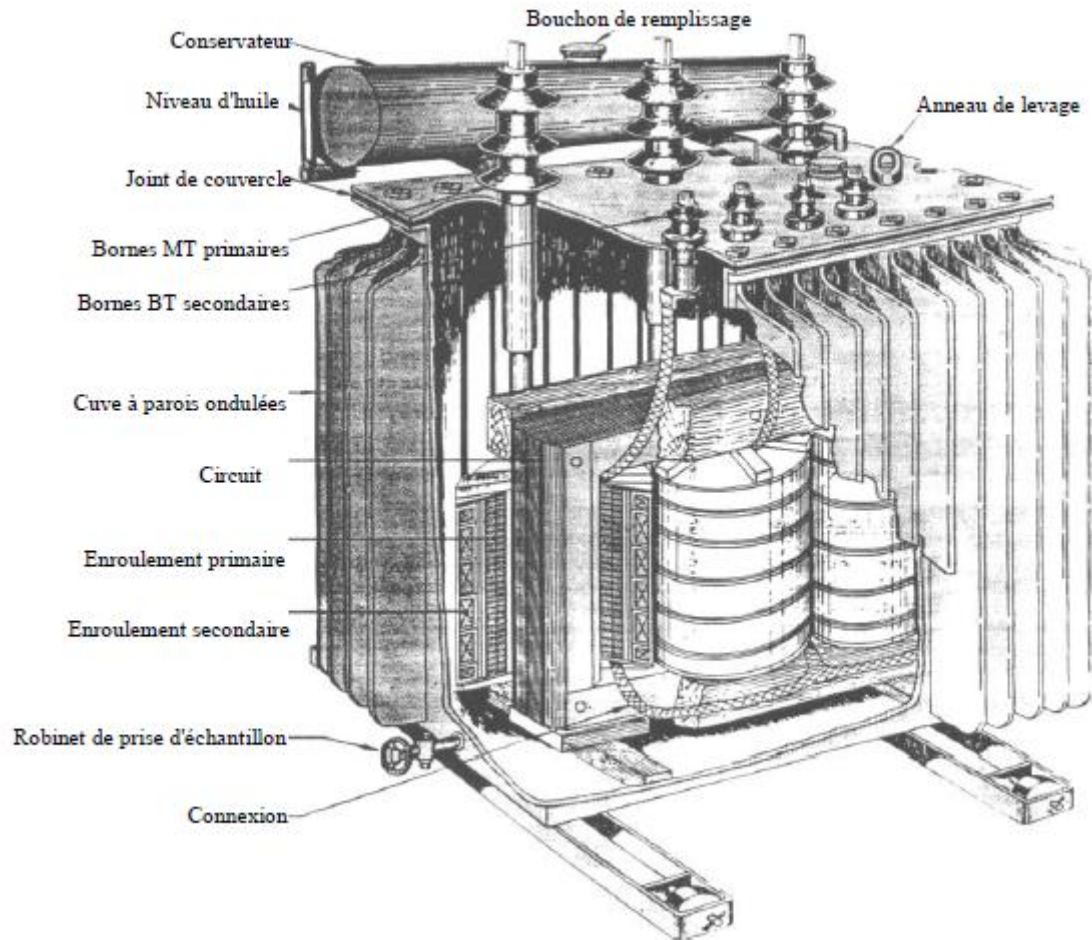


Figure1-19 : Composants d'un transformateur de puissance. [2]

1-12 : Echauffement et refroidissement des transformateurs : [2], [4].

1-12-1 : 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 des effets dont :

- Pertes d'énergie.
- Action de chaleur sur les métaux.
- Action sur les isolants et vernis.

A fin d'éviter cela il faut refroidir le transformateur.

1-12-2 : Refroidissement :

Les causes d'échauffement dans le transformateur et les solutions utilisées rendent le phénomène d'échauffement important. Pour ne pas avoir une détérioration du transformateur, il faut utiliser des moyens de refroidissement dont on peut citer le :

- refroidissement à air.
- refroidissement à l'huile.
- refroidissement par radiateur à l'huile.
- refroidissement artificiel dans l'huile.

1-13 : Régimes de fonctionnement : [3]

On peut citer les régimes suivants :

1-13-1 : 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.

1-13-2 : 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 considérables.

1-13-3 : 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 2

Opérations de fabrication d'un transformateur



2.1 : Introduction :

La fabrication des transformateurs de puissance se fait au département de production, sa mission est de fabriquer tous les constituants des parties des transformateurs. Le service de production englobe les ateliers qui forment la chaîne de production jusqu'au montage global.

Les ateliers de production sont :

- l'atelier de bobinage ;
- l'atelier d'empilage du noyau ;
- l'atelier de montage - encuvage ;
- l'atelier de mécanique ;

Dans ce chapitre, nous allons décrire les opérations de fabrication d'un transformateur et les étapes nécessaires sont données dans les paragraphes ci-après.

2.2 : Fabrication mécanique :

Dans l'atelier de fabrication mécanique sont fabriqués tous les éléments qui constituent la partie constitutive du transformateur. Le transformateur est constitué de :

- La cuve est 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 la cuve, on passe par la réalisation des différents éléments qui constituent la cuve et pour cela on passe par plusieurs phases.

• Phase 1 : Réalisation des parois ondulées :

Le matériau utilisé pour la fabrication est le ST37.2, d'une épaisseur de 1.2 mm sous forme de rouleau de largeur variable suivant le type de transformateur. La réalisation des parois ondulées se fait comme suit :

- Placement du rouleau de tôles sur la machine qui réalise les ondulations selon le dimensionnement qu'on va introduire.
- Pliage de la tôle selon la forme d'ondulations avec 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.

Notons que chaque étape mentionnée est réalisée avec une machine spéciale.

- **Phase 2 : Réalisation de la partie inférieure : [1].**

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, les tôles coupées seront envoyées vers la machine plieuse afin de leur donner la forme « U ».

On continuera la procédure selon les 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 guidage 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.

Après avoir mis fin au montage de la partie inférieure, cette dernière sera conduite au poste de sablage puis au dressage.

- Le sablage est une opération où on enlève toute la rouille par injection sous pression d'un sable dit « Grenaille d'acier » de type 0.9 à 1mm.

➤ Le dressage est une opération d'élimination de toutes les bavures et de redressement de toutes les déformations causées lors de la soudure ou du sablage.

- **Phase 3 : Réalisation du cadre :**

Le cadre se situe entre les parois ondulées et le couvercle. Le matériau utilisé est un acier doux qui arrive sous forme de profilés. 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 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 les joints d'étanchéité.

- **Phase 4 : Montage de la cuve :**

Le montage de la cuve se fait selon les étapes suivantes :

- 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.
- Application de 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 rayons ultraviolets.
- Correction des défauts de soudure avec un chalumeau.
- Application de la peinture.
- Après serrage, 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. Les étapes de réalisation du couvercle sont données ci-après :

- Découpage de la tôle sous forme de rectangle aux dimensions voulues.
- Poinçonnage des trous nécessaires sur le couvercle tels que :
 - * Trois trous pour l'emplacement des isolateurs haute tension (HT).
 - * Quatre trous pour l'emplacement des traversées basse tension (BT).

- * Deux trous pour l'emplacement des poches pour thermomètres.
- * Trente quatre trous ou plus pour la fixation du couvercle sur la cuve.
- * Deux trous pour les éclisses.
- Soudage des pièces suivantes :
 - * Les deux crochets de levage.
 - * Les deux cornières d'appui 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 du côté haute tension.
 - * 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 qui se réalisent suivant ces étapes :

- Découpe de la tôle sur une largeur calculée suivant le type du transformateur à réaliser.
- Perçage de la tôle comme suit :
 - * Deux trous pour le serrage du noyau.
 - * Deux trous pour les tôles de serrage et la fixation du support du couvercle.
- Sablage et dressage.
- Contrôle de qualité et des dimensions.

d- Les sièges et les boulons de serrage :

Ils sont au nombre de quatre et sont présentés sous forme de barres cylindriques en acier A48. Ils servent à renforcer le serrage de la partie supérieure à la partie inférieure. Les deux boulons d'acier A48 servent à la suspension et le serrage des tôles de serrage.

2.3 : Fabrication électrique (bobinage) :

Il consiste en la fabrication des enroulements (bobines) figure 2.1. Ces derniers sont réalisés à partir de conducteurs en cuivre de section circulaire ou rectangulaire.

Il existe deux types d'enroulements :

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



Figure 2-1 : Enroulements d'un transformateur.

2.3.1 : Enroulement secondaire (BT) :

L'enroulement BT est constitué de deux couches de fil conducteur en cuivre, de forme rectangulaire appelé méplat enroulé l'une sur l'autre et 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 les différentes phases suivantes :

- **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, sur 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 papier presspahn (PSP) de 0.105 mm et 0.2 mm.
 - L'isolation finale se fait par un recouvrement à 50% en papier fil guipé (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.

2.3.2 : Enroulement primaire (HT) :

Pour la conception des bobines de haute tension, le fil utilisé varie suivant la puissance du transformateur et le mode d'enroulement.

Il y a deux types d'enroulements :

- Enroulement HT en couches.
- Enroulement HT en galettes.

❖ Enroulement en couches :

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 presspahn de 0.2mm.
 - 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 avec un recouvrement à 50% en (Papier fil guipé) PFG.
- **Phase 4 : Contrôle de qualité.**

Cette phase a pour but de contrôler les bobines en ce qui concerne :

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

❖ **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 constituée de plusieurs couches de fil conducteur en cuivre de forme circulaire isolé au papier fil guipé (PFG).

Réalisation :

- **Phase 1 : Mise en place du gabarit suivant la gamme d'usinage.**
- **Phase 2 : Phase d'enroulement et renforcement de l'isolation.**

Choix de la section du fil guipé selon le type de transformateur.

 - Exécution du bobinage de la galette.
 - Renforcement de l'isolation avec 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.**

Contrôle des bobines dans :

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

2.4 : Fabrication du noyau (circuit magnétique) :

Cette partie est effectuée dans l'atelier de fabrication électrique, qui est équipé de plusieurs machines automatiques pour le découpage de la tôle. Le constructeur utilise la tôle VMP97-30 d'acier doux. Elle est livrée sous forme de rouleau avec une extrémité reliée à une chaîne de machines automatiques programmables qui exécutent toutes les opérations nécessaires pour le découpage de la tôle.

Le circuit magnétique est disposé en :

- Colonne latérale.
- Colonne centrale.
- Culasse supérieure.
- Culasse inférieure.

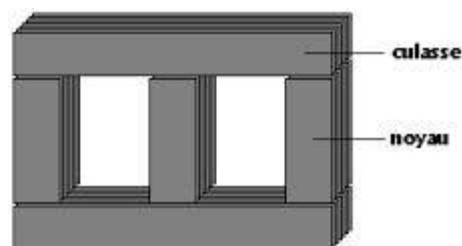


Figure 2-2: Schéma montrant les culasses et les colonnes du transformateur.

Phases de réalisation :**• Phase 1 : Réalisation des culasses :**

Pour cela on effectue les étapes suivantes :

- Affectation des trous sur la culasse.
- Dégagement sous forme de V formant un angle de 90° et une autre coupe de 45° sur chaque extrémité.

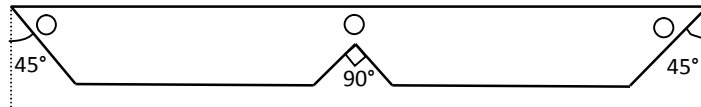


Figure 2-3 : Réalisation des culasses.

• Phase 2 : Réalisation des colonnes latérales :

Elle se déroule en une seule opération avec l'affectation d'une coupe sur chaque extrémité d'un angle de 45° .



Figure 2-4 : Réalisation des colonnes latérales.

• Phase 3 : Réalisation de la colonne centrale :

Avec la même procédure que celle de la précédente sauf que celle-ci subit deux coupes de 45° de chaque côté.

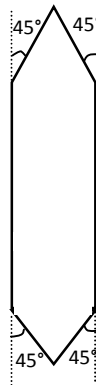


Figure 2-5 : Réalisation des colonnes centrales.

- **Phase 4 : Montage du noyau.**

Sur une table bien équipée spécialement aménagée on place le gabarit d'empilage, cette table est munie d'un dispositif qui sert à maintenir la table de serrage et de deux tiges pour centrer les tôles de la culasse inférieure à cette dernière.

Pour cela on place 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.

Puis il vient l'empilage du noyau dont on empile les tôles de la culasse inférieure deux par deux sur la tôle de serrage.

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.

Enfin 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.

2.5 : Montage :

Cette opération a pour but de finaliser le produit fabriqué, une fois que les parties constitutives sont achevées. Ces parties passent ensuite à l'atelier de montage où sont réunis tous les organes magnétiques, électriques et mécaniques constituant le transformateur. Pour cela on réalise le montage des bobines sur le noyau puis on referme ce dernier par la culasse supérieure. On fixe les tôles de serrage et on réalise la connexion des bobines puis on passe à l'étape d'encuvage.

2.5.1 : Montage de la partie active :

Elle consiste à fixer les bobines BT et HT sur les trois colonnes du noyau tout en montant les bobines. Dans cette étape se fait l'introduction des écrans en papier, l'établissement des baguettes d'écartement en bois entre les colonnes et les bobines ainsi que le renforcement de l'isolant entre les extrémités supérieures des bobines et la culasse avec du papier PSP.

Puis il vient la mise en place des cales d'appui du côté supérieur des bobines ainsi que :

- le montage de la culasse supérieure tôle par tôle,
- le vissage des tiges de serrage,
- la fixation des pattes de serrage,
- la fermeture de la culasse supérieure avec la fixation des deux tôles de serrage supérieures.

Enfin, on procède au contrôle de la partie active après le montage.

2.5.2 : Branchement de la basse tension et de la haute tension :**a- Branchement de la basse tension :**

Le branchement de la basse tension se fait par la fixation du gabarit, 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.

b- Branchement de la haute tension :

Cette étape se déroule en fixant le gabarit à une hauteur bien déterminée puis en fixant le commutateur de réglage sur le gabarit, les prises doivent être connectées au plot du commutateur.

2.5.3 : 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, on le contrôle par l'isolation des connexions des bobines.

2.6 : 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 sept à heures. La figure 2-6 montre l'opération de séchage.



Figure 2-6 : séchage des parties active du transformateur.

2.7 : 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 HT sont bridés sur le couvercle.

2.8 : Encuvage :

Dans cette partie on monte le couvercle sur la partie active à l'aide de deux écrous qui se vissent sur les tiges filetées. On fixe les bornes de l'enroulement aux isolants, on monte le commutateur sur le couvercle avec des pattes de suspension. Et enfin le couvercle est assemblé au cadre de la cuve avec des boulons. La figure 2-7 montre l'opération d'encuvage des parties actives du transformateur.



Figure 2-7 : Encuvage des parties active du transformateur.

2.9 : Remplissage d'huile :

Cette opération consiste à remplir le transformateur dans un four de remplissage sous vide pendant une durée de trois 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 2-8 : Remplissage du transformateur.

2.10 : Vérification du transformateur : [7].

Cette opération s'effectue sur une plate forme d'essai où le transformateur subit un contrôle avant son expédition. Cette opération englobe les trois essais suivants.

- **Essais individuel** : où on vérifie si les conditions de son fonctionnement sont conformes à celles du transformateur ayant subi les essais de type.
- **Essais de type** : qui nous permettent d'avoir une mesure sur l'échauffement de l'huile et des enroulements.
- **Essais spéciaux** : ces essais nous permettent de mesurer le bruit et la résistance du neutre par rapport à la masse.

2.11 : Les retouches finales :

Si les essais effectués sur le transformateur sont favorables, le transformateur sera transféré vers la chambre de peinture, enfin on place la plaque signalétique et on livre le produit fini vers l'expédition.

Chapitre 3

Calculs électromagnétiques



3-1 : Introduction :

Dans ce chapitre et les chapitres qui vont suivre, nous allons entamer le dimensionnement du transformateur MT/MT qui nous a été proposé. Ce transformateur sera calculé en conformité avec le cahier des charges ci-dessous.

Puissance nominale : 630 kVA

Tension primaire : 30 kV

Tension secondaire : 5.7 kV

Perte à vide : 1.4 kW

Pertes en court-circuit : 8.3 kW

Couplage : Dyn11

Tension de court-circuit : 6%

Température ambiante : 50 °C

La partie active d'un transformateur est le circuit magnétique d'un transformateur (noyau) et électrique (les enroulements), leurs dimensions sont essentiellement, le diamètre de la colonne, la hauteur des bobines et le diamètre du canal de fuite.

Dans ce chapitre, nous calculons les dimensions des différentes parties actives, magnétiques et électriques d'un transformateur.

3-2 : Calculs préliminaires des dimensions principales :

Les dimensions principales d'un transformateur sont :

- Le diamètre de la colonne D .
- La distance entre colonnes L_f .
- La distance entre culasse H_c .

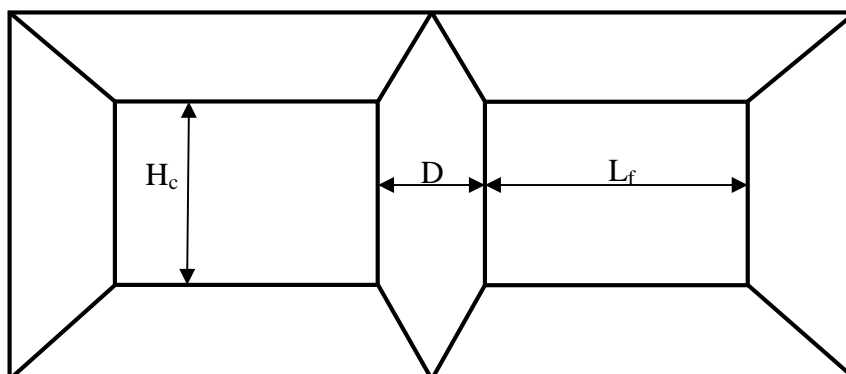


Figure 3-1 : Dimensions principales d'un transformateur.

3-2-1 : Puissance apparente par colonne :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$S_c = \frac{S_n}{n_c} \text{ [kVA].}$$

- S_n : Puissance apparente nominale du transformateur ;
- n_c : Nombre de colonnes égal à 3.

$$S_c = \frac{630}{3}$$

$$S_c = 210 \text{ kVA}$$

3-2-2 : Tension dans les enroulements :

La tension de phase dépend du mode de couplage de l'enroulement. Le couplage de notre transformateur est Dyn₁₁.

- « D » indique que l'enroulement primaire est couplé en triangle ;
- « y » indique que l'enroulement secondaire est couplé en étoile ;
- « n » indique que le neutre est distribué au niveau du secondaire ;
- « 11 » Indique que la tension secondaire est en retard de $\frac{11\pi}{6}$ sur la tension primaire.

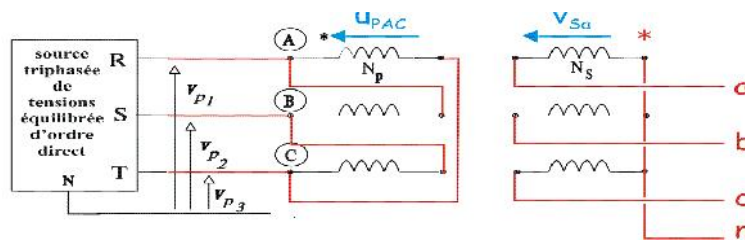


Figure 3-2 : Couplage Dyn₁₁

3-2-2-1 : Enroulement primaire :

La tension de phase de l'enroulement primaire est :

$$U_{ph1} = U_{n1} \text{ [kV]}$$

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

- U_{n1} : Tension composée primaire nominale.

3-2-2-2 : Enroulement secondaire :

La tension de phase de l'enroulement secondaire est :

$$U_{ph2} = \frac{Un2}{\sqrt{3}} \text{ [kV]}$$

$$U_{ph2} = \frac{5.7}{\sqrt{3}} = 3.3$$

$$U_{ph2} = 3.3 \text{ kV}$$

➤ U_{n2} : Tension composée secondaire nominale.

3-2-3: Courants 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. Il est donné par la formule suivante :

$$I_{ph} = \frac{Sn}{U_{ph}\sqrt{3}}$$

3-2-3-1 : Courant dans l'enroulement primaire :

$$I_{ph1} = \frac{Sn}{U_{ph1}\sqrt{3}} \text{ [A]}$$

$$I_{ph1} = \frac{630}{30\sqrt{3}}$$

$$I_{ph1} = 12.12 \text{ A}$$

3-2-3-2: Courant dans l'enroulement secondaire:

$$I_{ph2} = \frac{Sn}{U_{ph2}\sqrt{3}} \text{ [A]}$$

$$I_{ph2} = \frac{630}{5.7\sqrt{3}}$$

$$I_{ph2} = 63.81 \text{ A}$$

3-2-4: Tension de court circuit:

La tension de court-circuit est la tension qu'il faut appliquer au primaire d'un transformateur, le secondaire étant court-circuité, afin de faire circuler les courants nominaux primaire et secondaire. Elle s'exprime en pourcentage (%) de la tension U_{1n} . Elle est donnée par la relation suivante :

$$U_{cc} = \sqrt{U_{cca}^2 + U_{ccr}^2} \quad [\%].$$

➤ U_{cca} : composante active, elle est donnée par la formule suivante :

$$U_{cca} = \frac{P_{cc}}{Sn} \times 100 \quad [\%]$$

$$U_{cca} = \frac{8.3}{630} \times 100$$

$$U_{cca} = 1.32 \%$$

➤ U_{ccr} : composante réactive, elle est donnée par la formule suivante:

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

$$U_{ccr} = \sqrt{6^2 - 1.32^2}$$

$$U_{ccr} = 5.85 \%$$

3-2-5 : Diamètre et section de la colonne :

Le diamètre de la colonne est donné par l'expression suivante :

$$D = \sqrt[4]{\frac{\mu_0 \times a_r \times k_R \times \beta \times 16 \times S_c}{\pi^3 \times k_u^2 \times B_c^2 \times U_{ccr} \times f}} \quad [\text{cm}]$$

Les paramètres S_c et U_{ccr} étant définis, il nous reste à définir les paramètres suivants : a_r , β , k_R , k_u , et B_c .

3-2-5-1 : Epaisseur rapporté du canal a_r :

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

Le terme $\frac{a_1 + a_2}{3}$ est calculé en fonction de la puissance apparente par colonne du transformateur par la relation :

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = k \sqrt[4]{S_c} \quad [\text{cm}]$$

- K : Coefficient donné en fonction de la puissance apparente par colonne et la tension la plus grande.
- a_1 : Epaisseur de l'enroulement primaire.
- a_2 : Epaisseur de l'enroulement secondaire.
- a_{12} : Largeur du canal de fuite principale, elle est choisie en fonction de la tension la plus élevée du transformateur ; sa valeur est donnée par le tableau 3-1.

Tableau 3-1

U_n [kV]	3	8	10	15	20	35	60	170	220
a_{12} [cm]	0.6	à 1	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 de canal de fuite qui vaut :

$$a_{12} = 2.1 \text{ cm}$$

La valeur de k est donnée par le tableau 3-2.

Tableau 3-2.

S_c [kVA]	<100	100 à 500	750 à 5600	7500 à 31500
U_n [kV]	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 on prend pour K une valeur suivante :

$$K = 0.4 \quad \text{donc : } \frac{a_1+a_2}{3} = 0.4 \sqrt[4]{210}$$

$$\frac{a_1+a_2}{3} = 1.52 \text{ cm}$$

Donc : $a_r = 2.1 + 1.52$

$$a_r = 3.62 \text{ cm}$$

3-2-5-2 : Coefficient de sveltesse :

Ce coefficient de forme nous renseigne sur le prix de réalisation et d'exploitation du transformateur, il est donné par la relation suivante :

$$= \frac{\pi \times D_{12}}{h_b}$$

- D_{12} : diamètre du canal de fuite.
- h_b : hauteur de la bobine.

La relation précédente montre que le coefficient de sveltesse est fonction de deux grandeurs géométriques principales du transformateur. Selon sa valeur, le transformateur sera svelte ou trapu.

La valeur de λ dépend de la puissance par colonne, de la tension la plus grande et du type du matériau utilisé pour le bobinage. Pour notre cas on utilise des conducteurs en cuivre pour la conception des bobines. λ varie entre 1.8 et 3.

Pour un calcul préliminaire on prend λ égale à **2**.

3-2-5-3: Coefficient de ROGOWSKI K_R :

C'est un facteur de réduction de la hauteur de l'enroulement par rapport à la longueur théorique des lignes de champ de dispersion. Il est donné par la relation suivante :

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

Sa valeur est comprise entre 0.90 et 0.97

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

3-2-5-4 : Facteur d'utilisation de la section du fer :

Il est donné par la relation :

$$K_u = k_g \times k_r$$

- k_r : Coefficient de remplissage, il dépend de l'épaisseur des tôles utilisées 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 par colonne S_c .

Il est donné par le tableau suivant :

Tableau 3-4.

S_n [kVA]	<5	5 à 15	15 à 45	45 à 500
n gradins	2	4	5	6
D approché	<8	8 à 12	12 à 16	16 à 51
k_g	0.786	0.886	0.91	0.93

Pour un calcul préliminaire on prend :

$k_g = 0.93$ et $k_r = 0.95$ donc :

$$K_u = 0.93 \times 0.95$$

$$K_u = 0.8835$$

3-2-5-5 : Induction de crête B_c :

Cette induction est choisie en fonction de la puissance du transformateur et du type de tôles utilisées. Pour notre cas on prend $B_c = 1.71$ T

3-2-5-6 : Perméabilité magnétique du vide μ_0 :

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

3-2-5-7 : Fréquence industrielle f :

Sa valeur est imposée par le réseau, cette fréquence est $f = 50 \text{ Hz}$.

➤ La valeur du diamètre de la colonne est :

$$D = \sqrt[4]{\frac{16 \times 4\pi \times 0.96 \times 2 \times 3.62 \times 210 \times 10^{-7} \times 10^{-2} \times 10^3}{0.0585 \times 50 \times 1.71^2 \times \pi^3 \times 0.8835^2}}$$

$$D = 19.4 \text{ cm}$$

➤ La section de la colonne S_{fer} vaut :

$$S_{\text{fer}} = \frac{\pi \times D^2}{4} \times K_u \quad [\text{cm}^2]$$

$$S_{\text{fer}} = \frac{3.14 \times 19.4^2}{4} \times 0.8835$$

$$S_{\text{fer}} = 261 \text{ cm}^2$$

3-2-6: Diamètre du canal de fuite D_{12} :

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

➤ a_{20} : Distance entre la colonne et l'enroulement basse-tension.

Pour un calcul préliminaire on prend $a_{20} = 0.8 \text{ cm}$

➤ a_2 : est l'épaisseur de l'enroulement basse tension, elle est donnée par :

$$a_2 = k_{a2} \sqrt[4]{S_c} \quad [\text{cm}]$$

$$K_{a2} = 0.58$$

$$a_2 = 0.58 \times \sqrt[4]{210}$$

$$a_2 = 2.2 \text{ cm}$$

$$D_{12} = 19.4 + (2 \times 0.8) + (2 \times 2.2) + 2.1$$

$$D_{12} = 27.5 \text{ cm}$$

3-2-7 : Hauteur approximative des enroulements :

Si on considère que les deux enroulements ont la même hauteur, on aura la formule suivante :

$$h_b = \frac{\pi \times D_{12}}{\beta} \quad [\text{cm}]$$

$$\beta_b = \frac{3.14 \times 27.5}{2}$$

$$h_b = 43.2 \text{ cm}$$

3-3: Calcul des enroulements:

3-3-1: Tension d'une spire:

Sa valeur est la même pour les deux enroulements car ces derniers sont embrassés par le même flux principal. Elle est donnée par la relation suivante :

$$U_{sp} = \bar{2} \times \times f \times B_c \times S_{fer} \text{ [V]}$$

$$U_{sp} = \bar{2} \times \times 50 \times 1.71 \times 261 \times 10^{-4}$$

$$U_{sp} = 9.9 \text{ V}$$

3-3-2: Nombre de spires:

3-3-2-1 : Enroulement secondaire :

$$N_2 = \frac{U_{ph2}}{U_{sp}} \text{ [spires]}$$

$$N_2 = \frac{3.3 \times 10^3}{9.9}$$

$$N_2 = 333 \text{ spires}$$

3-3-2-2 : Recalcul de la tension de spire :

$$U_{sp} = \frac{U_{ph2}}{N_2} \text{ [V]}$$

$$U_{sp} = \frac{3.3 \times 10^3}{333}$$

$$U_{sp} = 9.9 \text{ V}$$

3-3-2-3: Enroulement primaire:

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

$$N_1 = N_2 \times \frac{U_{ph1}}{U_{ph2}} \text{ [spires]}$$

$$N_1 = 333 \times \frac{30}{3.3}$$

$$N_1 = 3027 \text{ spires}$$

3-3-2-4 : Recalcul de l'induction crête :

La section des conducteurs est donnée par la relation suivante :

$$B_c = \frac{U_{sp}}{S_{fer} \times \pi \times 2} \quad [\text{T}]$$

$$B_c = \frac{9.9}{3.14 \times 50 \times 261 \times 10^{-4} \times 2}$$

$$B_c = 1.71 \text{ T}$$

3-3-2-5 : Calcul du nombre de spires de réglage :

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

- Le nombre de spires nominal est :

$$N_{1nom} = 3027 \text{ spires}$$

- Le nombre de spires maximal est :

$$N_{1max} = N_{1nom} + (5\% \times N_{1nom}) \text{ [spires]}$$

$$N_{1max} = 3027 + (0.05 \times 3027)$$

$$N_{1max} = 3178 \text{ spires}$$

- Le nombre de spires minimal est :

$$N_{1min} = N_{1nom} - (5\% \times N_{1nom}) \text{ [spires]}$$

$$N_{1min} = 3027 - (3027 \times 0.05)$$

$$N_{1min} = 2875 \text{ spires}$$

- Le nombre de spires de réglage est :

$$N_r = N_{1nom} - N_{1min} \text{ [spires]}$$

$$N_r = 3178 - 2875$$

$$N_r = 303 \text{ spires}$$

3-3-3 : Section des conducteurs :

La section des conducteurs est donnée par la relation suivante :

$$S = \frac{I}{J_m} \text{ [mm}^2\text{]}$$

- S : section du conducteur.
- J_m : Densité du courant.

3-3-3-1 : Calcul de la densité moyenne du courant :

$$J_m = \frac{1}{2 \times \pi \times \rho_T \times K_{PCC}} \times \frac{P_{CC}}{S_n} \times \frac{U_{sp}}{D_{12}} \quad [\text{A/mm}^2].$$

- P_{CC} : Pertes en court-circuit en [W].
- k_{pcc} : Facteur tenant compte des pertes supplémentaires en court-circuit, il est fonction de la puissance apparente du transformateur, sa valeur est donnée par le tableau 3-5.

Tableau 3-5.

S_n [kVA]	30	180	600	1000	1600	2000	2500	4000
k_{PCC}	1.020	1.025	1.050	1.060	1.070	1.075	1.080	1.090

$$K_{pcc} = 1.050$$

- ρ_T : Résistivité du cuivre, elle vaut 0.0178 [. mm²/m]

$$\rho_T = \rho_{20} [1 + \alpha (T - 20)] \quad [. \text{ mm}^2/\text{m}]$$

$$\text{Avec } \alpha = 3.81 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C et } T = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_T = 0.0178 \times (1 + 3.81 \times 10^{-3} \times (50 - 20))$$

$$\rho_T = 0.0198 \quad . \text{ mm}^2/\text{m}$$

Finalement :

$$J_m = \frac{1}{2\pi \times 0.0198 \times 1.050} \times \frac{8.3}{630} \times \frac{9.9}{27.5 \times 10^{-2}}$$

$$J_m = 3.63 \text{ A/mm}^2$$

Cette valeur est acceptable car elle est inférieure à la valeur maximale admissible et supérieure à la valeur minimale requise de la densité du courant, ($1.5 \leq J_m \leq 4.5$).

3-3-3-2 : Section des conducteurs du secondaire :

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

I_{ph2} : courant nominal traversant l'enroulement secondaire.

$$S_2 = \frac{63.81}{3.63}$$

$$S_2 = 17.58 \text{ mm}^2$$

Afin de normaliser la section S_2 trouvée précédemment on utilise le tableau 3-6 donné ci-après.

Ainsi la section normalisée vaut : **17.6 mm²** avec **b = 8** et **a = 2.24**.

Avec :

- a: épaisseur du conducteur en mm.
- b: largeur du conducteur en mm.

Tableau 3-6 : Section et dimensions des conducteurs méplats non isolés.

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	11.0	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	49.1	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	125.0
8.5											105.0		118.0		135.0

Le tableau montre la méthode.

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

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

- Calcul de la densité du courant secondaire :

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

$$J_2 = \frac{63.81}{17.6}$$

$$J_2 = 3.62 \text{ A/mm}^2$$

- Erreur commise sur la densité du courant:

$$\frac{J_{m2}}{J_m} = \frac{J_m - J_2}{J_2} \times 100[\%]$$

$$\frac{J_{m2}}{J_m} = \frac{3.63 - 3.62}{3.63} \times 100$$

$$\frac{J_{m2}}{J_m} = 0.27\%$$

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

3-3-3-3 : Section du conducteur du primaire :

$$S_1 = \frac{I_{ph1}}{J_m} \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$S_1 = \frac{12.12}{3.63 \sqrt{3}}$$

$$S_1 = 1.92 \text{ mm}^2$$

On calcule d_1 :

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \times S_1}{\pi}} \text{ [mm]}$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \times 1.92}{\pi}}$$

$$d_1 = 1.56 \text{ mm}$$

On prend d_{1n} (normalisé):

$$d_{1n} = 1.8 \text{ mm} \quad \text{et} \quad d_{\text{isolé}} = 1.888 \text{ mm}$$

- **Section normalisée :**

$$S_{1n} = \frac{\pi \times 1.8^2}{4} \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$S_{1n} = \frac{\pi \times 1.8^2}{4}$$

$$S_{1n} = 2.54 \text{ mm}^2$$

- **Calcul de la densité du courant primaire :**

$$J_1 = \frac{I_{ph1}}{S_{1n}} \text{ [A/mm}^2\text{]}$$

$$J_1 = \frac{12.12}{2.54 \times \sqrt{3}}$$

$$J_1 = 2.75 \text{ A/mm}^2$$

Le tableau suivant montre la méthode de normalisation du diamètre isolé.

Tableau 3-7.

Diamètre de fil nu [mm]	Diamètre de fil isolé [mm]	Diamètre de fil nu en [mm]	Diamètre de fil isolé [mm]
0.02	0.025	1.32	1.397
0.08	0.098	1.40	1.479
0.10	0.121	1.50	1.581
0.20	0.230	1.60	1.683
0.40	0.442	1.70	1.785
0.80	0.861	1.80	1.888
0.85	0.913	1.90	1.990
0.90	0.965	2.00	2.092
0.95	1.017	2.12	2.214
1.00	1.068	2.24	2.335
1.06	1.130	2.36	2.549
1.12	1.192	2.50	2.601

3-3-4 : Hauteur des enroulements :

3-3-4-1 : Hauteur magnétique du bobinage secondaire :

$$h_{m2} = \frac{N_2}{2} (a + I_{iso}) \text{ [mm]}$$

$$h_{m2} = \frac{333}{2} (2.24 + 0.45)$$

$$h_{m2} = 447.8 \text{ mm}$$

- Calcul de la hauteur de la bobine secondaire:

$$h_{B2} = (N_2/2 + 1) \times (a + I_{iso}) \text{ [mm]}$$

$$h_{B2} = (333/2 + 1) \times (2.24 + 0.45)$$

$$h_{B2} = 450.5 \text{ mm}$$

- Calcul de l'épaisseur de la bobine secondaire :

$$a_2 = 2 b' + c \text{ [mm]}$$

- b' : épaisseur du conducteur méplat avec isolation.
- C : épaisseur du canal de refroidissement, on le prend égal à 4 mm.

$$b' = b + I_{iso}$$

$$b' = 8 + 0.45$$

$$b' = 8.45 \text{ mm}$$

$$a_2 = 2 \times 8.45 + 4$$

$$a_2 = 21 \text{ mm}$$

- **Recalcul du diamètre du canal de fuite:**

$$D_{12} = D + 2a_2 + 2b_2 + a_{12} \text{ [cm]}$$

$$D_{12} = 19.4 + (2 \times 0.8) + (2 \times 2.1) + 2.1$$

$$D_{12} = 27.3 \text{ cm}$$

- **Correction du coefficient de sveltesse :**

$$\beta_r = \frac{\pi \times D_{12}}{h_{b2}}$$

$$\beta_r = \frac{\pi \times 27.3}{45.05}$$

$$\beta_r = 1.9$$

- ❖ Erreur commise sur le coefficient de Sveltesse

$$\frac{\beta}{\beta_r} = \frac{\beta \beta_r}{\beta} \times 100 [\%]$$

$$\frac{\beta}{\beta_r} = \frac{1.92}{2} \times 100$$

$$\frac{\beta}{\beta_r} = 5\%$$

L'erreur commise sur le coefficient de Sveltesse est inférieure à la valeur admissible qui est de 20%.

3-3-4-2 : Calcul de la hauteur du bobinage primaire :

$$h_{m1} = h_{b1} = h_{m2} - g \text{ [cm]}$$

On prend $g = 10 \text{ mm}$

$$h_{m1} = 447.8 - 10$$

$$h_{m1} = 437.8 \text{ mm}$$

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

$$N_{S1/c} = \frac{h_{b1}}{d_{iso}} \text{ [spires]}$$

$$N_{S1/c} = \frac{437.8}{1.888}$$

$$N_{S1/c} = 233 \text{ spires}$$

- **Nombre de couches pour l'enroulement primaire :**

$$N_c = \frac{N_{1max}}{N_{s1}/c} \text{ [couches]}$$

$$N_c = \frac{3178}{233}$$

$$N_c = 14 \text{ couches}$$

• **Épaisseur de l'enroulement primaire :**

$$a_1 = (N_c \times d_{iso}) + (N_c - 1) \times \sigma + c \text{ [mm]}$$

➤ **c** : épaisseur du canal de refroidissement égale à 4 mm. Avec 2 mm accordé comme erreur au bobineur.

➤ **σ** : Épaisseur du papier isolant entre couches égale à 0.2 mm.

$$a_1 = (14 \times 1.888) + (14 - 1) \times 0.20 + (4 + 2).$$

$$a_1 = 35 \text{ mm}$$

3-3-4-3 : hauteur du montage de bobines :

Les hauteurs de montage des bobines primaires et secondaires sont égales.

$$H_M = h_{b1} + 2d \text{ [mm]}$$

On prend $d = 15 \text{ mm}$

$$H_M = 437.5 + 2 \times 15$$

$$H_M = 467.5 \text{ mm}$$

3-3-4-4 : Dimensionnement de la cale de progression :

On utilise une cale de progression à chaque extrémité des bobines basse tension, cette cale est en papier dur. Elle a deux côtés différents : b_1 et b_2 . On l'utilise uniquement dans le bobinage basse tension.

$$b_{1p} = \frac{H_M - h_{b2}}{2} \text{ [mm]}$$

$$b_{1p} = \frac{470.5 - 450.5}{2}$$

$$b_{1p} = 10 \text{ mm}$$

$$b_{2p} = b_{1p} + a' \text{ [mm]}$$

$$a' = 2.24 + 0.45$$

$$a' = 2.69 \text{ mm}$$

$$b_{2p} = 10 + 2.69$$

$$b_{2p} = 12.69 \text{ mm}$$

3-3-5: Dimensionnement radial des enroulements:

3-3-5-1: Diamètre intérieur de la bobine basse tension :

$$D_{i2} = D + 2 \times a_{20} \text{ [cm]}$$

$$D_{i2} = 19.4 + 2 \times 0.8$$

$$D_{i2} = 21 \text{ cm}$$

3-3-5-2 : Diamètre extérieur de la bobine basse tension :

$$D_{ex2} = D_{i2} + (2 \times a_2) \text{ [cm]}$$

$$D_{ex2} = 21 + (2 \times 2.1)$$

$$D_{ex2} = 25.2 \text{ cm}$$

3-3-5-3 : Diamètre intérieur de la bobine haute tension :

$$D_{i1} = D_{ex2} + (2 \times a_{12}) \text{ [cm]}$$

$$D_{i1} = 25.2 + (2 \times 2.1)$$

$$D_{i1} = 29.4 \text{ cm}$$

3-3-5-4 : Diamètre extérieur de la bobine haute tension :

$$D_{ex1} = D_{i1} + (2 \times a_1) \text{ [cm]}$$

$$D_{ex1} = 29.4 + (2 \times 3.5)$$

$$D_{ex1} = 36.4 \text{ cm}$$

- Vérification de la tension du court-circuit :
- ❖ Epaisseur rapportée du canal de fuite :

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

$$a_r = 2.1 + \frac{3.5 + 2.1}{3}$$

$$a_r = 3.9 \text{ cm}$$

- ❖ Valeur définitive du facteur de ROGOWSKI :

$$K_R = 1 - \frac{a_1 + a_2 + 2a_{12}}{2 \times \pi \times h_{B2}}$$

$$K_R = 1 - \frac{3.5 + 2.1 + (2 \times 2.1)}{2 \times \pi \times 45.05}$$

$$K_R = 0.96$$

Finalemment:

$$U_{ccr}(\%) = \frac{2 \times \pi \times f \times \mu_0 \times \beta \times I_{ph1} \times a_r \times k_R \times N_1^2}{U_{1n}} \times 100$$

$$U_{ccr}(\%) = \frac{2\pi \times 50 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 1.9 \times 3.9 \times 10^2 \times 12.12}{30000} \times \frac{3 \times 0.96 \times 3027^2}{3} \times 100$$

$$U_{ccr} = 5.98 \%$$

$$U_{cc} = \sqrt{U_{cca}^2 + U_{ccr}^2} = \sqrt{1.32^2 + 5.98^2}$$

$$U_{cc} = 6.12\%$$

❖ Erreur relative sur la tension de court-circuit :

$$\frac{U_{cc}}{U_{cc}} \% = \frac{U_{cc} - U_{cc}}{U_{cc}} \times 100[\%]$$

$$\frac{U_{cc}}{U_{cc}} = \frac{6.12 - 6}{6}$$

$$\frac{U_{cc}}{U_{cc}} = 2\%$$

3-4: Dimensionnement du circuit magnétique :

Les colonnes et les culasses ont une même section, elle est de forme circulaire, étant donné ses avantages par rapport à une section carré ou rectangulaire. Pour se rapprocher de cette forme, on a recours à un empilage de tôles sous forme de gradins.

3-4-1 : Nombre et dimensions des gradins :

Le nombre des gradins nécessaire pour une puissance $S_c = 210$ kVA est de 6. Les normes donnent les valeurs suivantes pour les longueurs des gradins:

$$B_{s1} = 180\text{mm} \quad B_{s4} = 120\text{mm}$$

$$B_{s2} = 160\text{mm} \quad B_{s5} = 100\text{mm}$$

$$B_{s3} = 140\text{mm} \quad B_{s6} = 60\text{mm}$$

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

$$H_{si} = \sqrt{D^2 - B_{s1}^2}$$

$$H_{s1} = 72.36 \text{ mm}$$

$$H_{s2} = 109.70 \text{ mm}$$

$$H_{s3} = 134.29 \text{ mm}$$

$$H_{s4} = 152.43 \text{ mm}$$

$$H_{s5} = 166.24 \text{ mm}$$

$$H_{s6} = 184.48 \text{ mm}$$

La figure 3.7 donne une représentation schématique des gradins.

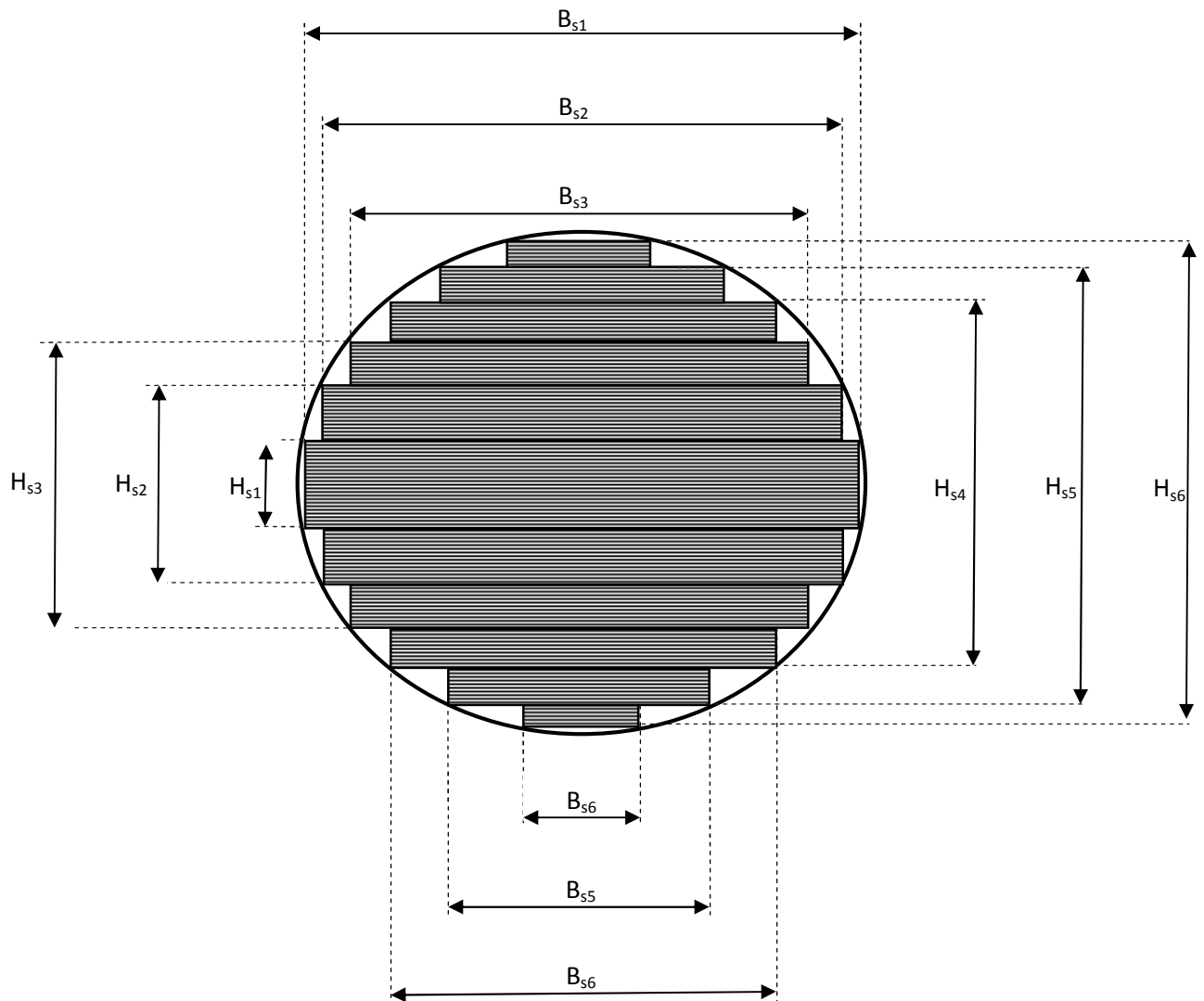


Figure 3-7 : Représentation des gradins

3-4-2: Longueur de la fenêtre:

$$L_f = D_{ex1} - B_{s1} + a_{11} \text{ [mm]}$$

- B_{s1} : Longueur du premier gradin.
- a_{11} : Distance latérale entre deux enroulements moyenne tension voisins, sa valeur est donnée par le tableau suivant.

Tableau 3-8

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

On prend $a_{11} = 30\text{m}$

$$L_f = 364 - 180 + 30$$

$$L_f = 214 \text{ mm}$$

3-4-3 : Hauteur de la fenêtre :

$$H_c = H_M + 30 \text{ [mm]}$$

$$H_c = 470.5 + 30$$

$$H_c = 500.5 \text{ mm}$$

Les 30 mm sont prévus pour les cales de fixation des bobines dans le sens axial.

3-4-4 : Hauteur du noyau :

$$H_n = H_c + 2 \times B_{s1} \text{ [mm]}$$

$$H_n = 500.5 + (180 \times 2)$$

$$H_n = 860.5 \text{ mm}$$

3-4-5 : Longueur entre axes des colonnes :

$$E_c = L_f + B_{s1} \text{ [mm]}$$

$$E_c = 214 + 180$$

$$E_c = 394 \text{ mm}$$

3-4-6 : Longueur du noyau :

$$L_n = 2 \times E_c + B_{s1} \text{ [mm]}$$

$$L_n = 366.8 \times 2 + 180$$

$$L_n = 913.6 \text{ mm}$$

3-4-7 : Section de la culasse :

Afin de diminuer la dissymétrie due à la distribution linéaire des colonnes, la culasse doit avoir une section supérieure de 15 à 20 % à celle de la colonne.

$$S_{cu} = S_{fer} + (0.15 \times S_{fer}) \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$S_{cu} = 261 + (0.15 \times 261)$$

$$S_{cu} = 300.15 \text{ mm}^2$$

Pour mieux appréhender les différentes dimensions des colonnes et de la partie active du transformateur, les figures 3-8 et 3-9 sont données.

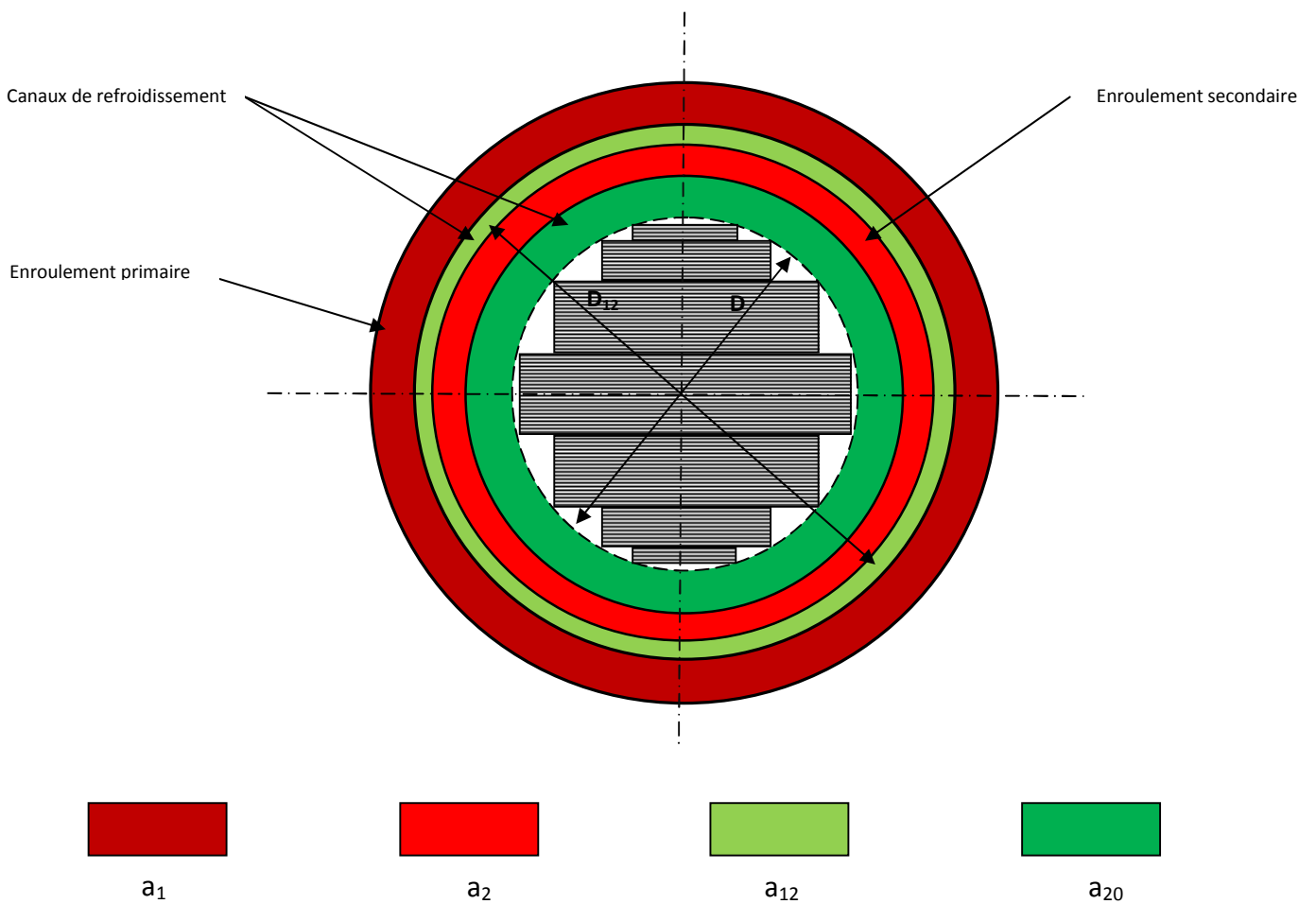


Figure 3-8 : Coupe général de la colonne.

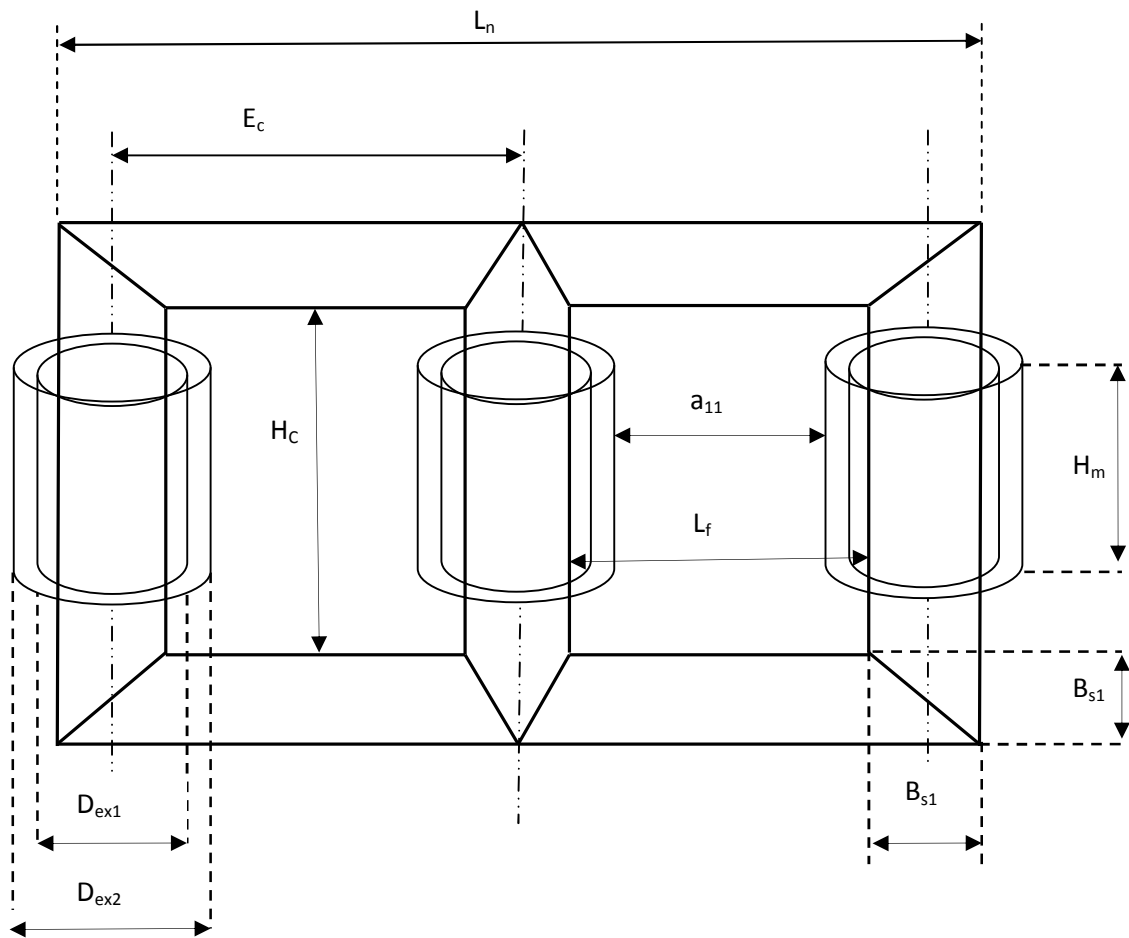


Figure 3-9 : Représentation de la partie active.

Chapitre 4

Calcul des pertes, rendement et Chute de tension



4-1 : Introduction :

Comme toute machine électrique, un transformateur est formé de fer et de cuivre. Il est donc le siège de pertes dans le fer et dans le cuivre.

4-2 : Pertes dans le transformateur :

- **Perte dans le fer :**

Les pertes fer qui peuvent être assimilées aux pertes à vide du transformateur sont localisées dans les tôles du circuit magnétique. Ce sont essentiellement les pertes par hystérésis et les pertes par courants de Foucault. La valeur des pertes dépend de la fréquence et de la valeur maximale de l'induction magnétique.

- **Pertes dans le cuivre :**

Les pertes dans le cuivre ou les pertes par effet Joule sont données par l'essai en court circuit, elles sont dissipées dans les bobines et dépendent des valeurs des intensités des courants primaire et secondaire.

4-2-1 : Pertes dans le fer (à vide):

Elles sont constantes. Elles dépendent du poids du noyau.

a- : Poids du noyau :

Pour calculer le poids du noyau on le divise en trois parties différentes [(1) les coins, (2) les colonnes, (3) les culasses] figure 4-1.

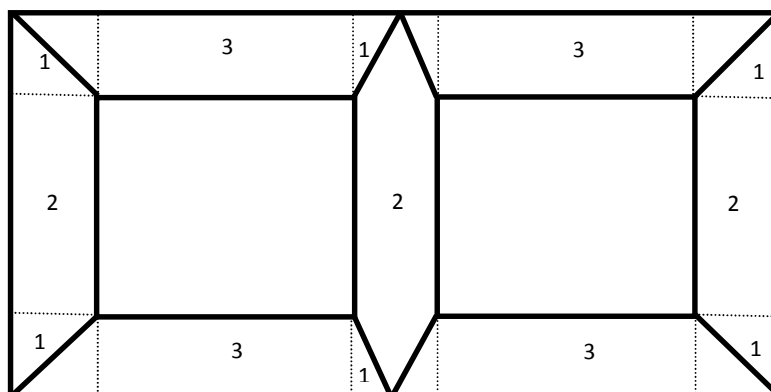


Figure 4-1: différentes parties du noyau.

$$G_n = G_1 + G_2 + G_3 \text{ [kg]}$$

- Poids total des coins G_1 :

$$G_1 = \gamma_{fer} \times N_1 \times B_{s1} \times S_{fer} \text{ [kg]}$$

$$G_1 = \gamma_{fer} \times V_1 \text{ [kg]}$$

- γ_{fer} : Masse volumique des tôles utilisées . $\gamma_{fer} = 7.65 \text{ kg/dm}^3$.
- N_1 : Nombre de coins, $N_1=6$.
- V_1 : volume total des coins.

$$V_1 = 6 \times B_{s1} \times S_{fer} [\text{dm}^3]$$

$$V_1 = 6 \times 180 \times 261 \times 10^{-4}$$

$$V_1 = 28.188 \text{ dm}^3$$

$$G_1 = 28.188 \times 7.65$$

$$G_1 = 215.6 \text{ kg}$$

- Poids des culasses G_2 :

$$G_2 = \gamma_{fer} \times N_2 \times 4 \times L_f \times S_{fer} \text{ [kg]}$$

$$G_2 = \gamma_{fer} \times V_2 \text{ [kg]}$$

- N_2 : Nombre de culasses, $N_2=2$.
- V_2 : volume total des culasses.

$$V_2 = 4 \times (L_f \times S_{fer}) [\text{dm}^3]$$

$$V_2 = 4 \times 214 \times 261 \times 10^{-4}$$

$$V_2 = 22.34 \text{ dm}^3$$

$$G_2 = 7.65 \times 22.34$$

$$G_2 = 170.9 \text{ kg}$$

- Poids des colonnes G_3 :

$$G_3 = \gamma_{fer} \times N_3 \times H_c \times S_{fer} \text{ [kg]}$$

$$G_3 = \gamma_{fer} \times V_3 \text{ [kg]}$$

- N_3 : Nombre de colonnes, $N_3=3$.
- V_3 : Volume total des colonnes.

$$V_3 = 3 \times (H_c \times S_{fer}) [\text{dm}^3]$$

$$V_3 = 3 \times (500.5 \times 261) \times 10^{-4}$$

$$V_3 = 39.19 \text{ dm}^3$$

$$G_3 = 7.65 \times 39.19$$

$$G_3 = 299.8 \text{ kg}$$

$$G_n = 215.63 + 170.91 + 299.80$$

$$G_n = 686.34 \text{ kg}$$

b- : Pertes dans le noyau P_0 :

$$P_0 = \delta_{1.5} \times K_{Bp} \times G_n \text{ [W]}$$

➤ $\delta_{1.5}$: Pertes spécifiques pour une induction donnée. Pour une induction de 1.5 T, ces pertes valent 1.1 W/kg.

➤ K_{Bp} : Coefficient correcteur des pertes spécifiques pour une induction différente de 1.5 T, sa valeur est donnée par le tableau 4-2.

Tableau 4-2

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

Dans notre cas, nous avons : $B_c = 1.71$ T.

$$\text{Donc : } K_{Bp} = 0.0536 \times e^{1.95B_c}$$

$$K_{Bp} = 0.0536 \times e^{1.95 \times 1.71}$$

$$K_{Bp} = 1.504$$

$$P_0 = 1.1 \times 1.504 \times 686.34$$

$$P_0 = 1135.48 \text{ W}$$

c- : Pertes supplémentaires :

• **Pertes supplémentaires dans les coins P_{s1} :**

Elles sont dues à la non continuité du circuit magnétique. Elles sont estimées à 50% des pertes fer dans les coins.

$$P_{s1} = 0.5 \times \gamma_{1.5} \times K_{Bp} \times G_1 \text{ [W]}$$

$$P_{s1} = 0.5 \times 1.1 \times 1.504 \times 215.63$$

$$P_{s1} = 178.36 \text{ W}$$

- **Pertes supplémentaires dans les culasses :**

Elles sont dues à la variation de la structure des tôles utilisées lors de l'usinage et elles sont estimées à 15% des pertes dans le noyau sans les coins.

$$P_{s2} = 0.15 \times \gamma_{1.5} \times K_{Bp} \times (G_1 + G_3) [W]$$

$$P_{s2} = 0.15 \times 1.1 \times 1.504 \times (215.63 + 299.8)$$

$$P_{s2} = 127.90 \text{ W}$$

- **Pertes totales à vide P_0 :**

$$P_0 = P_0 + P_{s1} + P_{s2} [W]$$

$$P_0 = 1135.48 + 178.36 + 127.9$$

$$P_0 = 1441.74 \text{ W}$$

4-2-2 : Pertes dans le cuivre (pertes Joule) :

Pour calculer les pertes dans le cuivre ou les pertes Joule, on doit d'abord déterminer la résistance des enroulements primaires et secondaires.

4-2-2-1 : Enroulement secondaire :

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

$$D_{m2} = D + 2a_{20} + a_2 [\text{cm}]$$

$$D_{m2} = 19.4 + (2 \times 0.8) + 2.1$$

$$D_{m2} = 23.1 \text{ cm}$$

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

$$L_{m2} = \pi \times D_{m2} [\text{cm}]$$

$$L_{m2} = \pi \times 23.1$$

$$L_{m2} = 72.534 \text{ cm}$$

c- **Longueur totale d'un enroulement L_2 :**

$$L_2 = N_2 \times L_{m2} [\text{cm}]$$

$$L_2 = 333 \times 72.534$$

$$L_2 = 24153.8 \text{ cm}$$

d- Résistance d'un enroulement R_2 :

$$R_2 = \rho_t \times \frac{L_2}{S_{2n}} \text{ [} \Omega \text{]}$$

- ρ_t : résistivité du cuivre à 50°C égale à 0.0198 [$\Omega \cdot m/mm^2$].
- S_{2n} : section du fil égale à 17.6 mm^2 .

$$R_2 = 0.0198 \times \frac{24153.8 \times 10^{-2}}{17.6}$$

$$R_2 = 0.271$$

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

$$G_{c2} = \rho \times L_2 \times S_{2n} \text{ [kg]}$$

- ρ : Densité volumique du cuivre égale à 8.9 kg/dm^3 .

$$G_{c2} = 8.9 \times 24153.8 \times 10^{-1} \times 17.6 \times 10^{-4}$$

$$G_{c2} = 37.83 \text{ kg}$$

f- Pertes Joule côté secondaire :

$$P_{cc2} = m \times K \times G_{c2} \times J_2^2 \text{ [W]}$$

- K : facteur tenant compte de la conductivité du cuivre à 75°C égale à 2.4

$$P_{cc2} = 3 \times 2.4 \times 37.83 \times 3.62^2$$

$$P_{cc2} = 3569.32 \text{ W}$$

g- Pertes supplémentaires côté secondaire :

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

Ce sont des pertes dues aux isolateurs, aux pièces de sortie et aux bornes de connexions, elles dépendent de la valeur du courant secondaire. Elles sont données par le tableau 4-3.

Tableau 4-3

D[mm]	A[mm]	S_n [kVA]	Courant basse tension [A]	P_{ex} [W]		
				Sans antnil	Avec antnil	
					a=20 mm	a=30 mm
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

$$P_{ex}=5 \text{ W}$$

- Pertes internes P_{in} :

$$P_{in} = \frac{e \times K \times m \times J_2^2 \times G_{c2} \times F}{N_2} \text{ [W]}$$

- 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 secondaire.
- e et F sont donnés par le tableau 4-4.

Tableau 4-4

Intensité du courant secondaire [A]	E	F	
		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		

Pour un courant secondaire égal à 63.81A, nous avons ; e = 1.04 et F = 1.

$$P_{in} = \frac{1.04 \times 2.4 \times 3 \times 3.62^2 \times 37.83 \times 1}{333}$$

$$P_{in} = 11.14 \text{ W}$$

- Pertes par connexion P_{con2} :

$$P_{con2} = R_{con2} \times I_{Ph}^2 [\text{W}]$$

$$R_{con2} = \frac{\rho_t \times L_{con2}}{S_{2n}} [\]$$

$$L_{con2} = 7.5 \times \sqrt[2]{b_2} [\text{cm}]$$

$$L_{con2} = 7.5 \times 45.05$$

$$L_{con2} = 337.87 \text{ cm}$$

$$R_{con2} = \frac{0.0198 \times 337.87 \times 10^{-2}}{17.6}$$

$$R_{con2} = 3.8 \times 10^{-3}$$

$$P_{con2} = 3.8 \times 10^{-3} \times 63.81^2$$

$$P_{con2} = 15.47 \text{ W}$$

- Pertes par effet pelliculaire P_{sup2} :

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

$$P_{sup2} = (K_{mr2} - 1) \times R_2 \times m \times I_{Ps2}^2 [\text{W}]$$

- K_{mr2} : Coefficient de majoration de la résistance en courant alternatif. Pour un conducteur méplat ce coefficient est donné par la relation suivante :

$$K_{mr2} = 1 + \frac{N_{c2}^2 - 0.2}{9} \times (\alpha_2 b)^4$$

- m: nombre de phases.
- N_{c2} : Nombre de couches au secondaire égale à 2 couches.

$$\alpha_2 = \frac{N_{s2} \times a \times \mu_0 \times \omega}{2H_C \times \rho_t}$$

- a : largeur du conducteur nu.
- \mathbb{E}_{m2} : Hauteur magnétique.
- N_{s2} : Nombre de spires par couche.
- ω : pulsation du réseau égale à $2\pi f$ avec f est la fréquence.
- μ_0 : Perméabilité magnétique du vide.

$$\alpha_2 = \frac{\frac{333}{2} \times 2.24 \times 10^{-3} \times 4 \times 3.14 \times 10^{-7} \times 2\pi \times 50}{2 \times 500.5 \times 10^{-3} \times 0.0198 \times 10^{-6}}$$

$$\alpha_2 = 86.14$$

$$K_{mr2} = 1 + \frac{2^2 - 0.2}{9} \times (86.14 \times 8 \times 10^{-3})^4$$

$$K_{mr2} = 1.095$$

$$P_{sup2} = (1.095 - 1) \times 0.271 \times 3 \times 63.81^2$$

$$P_{sup2} = 314.47 \text{ W}$$

h- Pertes totales en charge côté secondaire P_{CC2} :

$$P_{CC2} = P_{cc} + P_{ex} + P_{in} + P_{sup2} + P_{con} \text{ [W]}$$

$$P_{CC2} = 3569.32 + 5 + 11.14 + 15.47 + 314.47$$

$$P_{CC2} = 3915.4 \text{ W}$$

4-2-2-2 : Enroulement primaire :

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

$$D_{m1} = D + 2a_{20} + 2a_{12} + 2a_2 + a_1 \text{ [cm]}$$

$$D_{m1} = 19.4 + (2 \times 0.8) + (2 \times 2.1) + (2 \times 2.1) + 3.5$$

$$D_{m1} = 32.9 \text{ cm}$$

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

$$L_{m1} = \pi \times D_{m1} \text{ [cm]}$$

$$L_{m1} = \times 32.9$$

$$L_{m1} = 103.3 \text{ cm}$$

c- Longueur totale d'un enroulement L_1 :

$$L_1 = N_1 \times L_{m1} \text{ [cm]}$$

$$L_1 = 3027 \times 103.3$$

$$L_1 = 312689.1 \text{ cm}$$

d- Résistance d'un enroulement R_1 :

$$R_1 = \rho_t \times \frac{L_1}{S_{1n}} \text{ [} \Omega \text{]}$$

➤ ρ_t : résistivité de cuivre à 50°C égale à 0.0198 [$\Omega \cdot \text{m}/\text{mm}^2$].

➤ S_{1n} : section de fil égale à 2mm².

$$R_1 = 0.0198 \times \frac{312689.1 \times 10^{-2}}{2.54}$$

$$R_1 = 24.37$$

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

$$G_{c1} = \times L_1 \times S_{1n} \text{ [kg]}$$

➤ : Densité volumique de cuivre égale à 8.9kg/dm³ .

$$G_{c1} = 8.9 \times 312689.1 \times 10^{-1} \times 2.54 \times 10^{-4}$$

$$G_{c1} = 70.68 \text{ kg}$$

f- Pertes Joule côté primaire :

$$P_{cc1} = m \times K \times G_{c1} \times J_1^2 \text{ [W]}$$

➤ K : facteur tenant compte de la conductivité du cuivre à 75°C égale à 2.4

$$P_{cc1} = 3 \times 2.4 \times 70.68 \times 2.75^2$$

$$P_{cc1} = 3848.52 \text{ W}$$

g- Pertes supplémentaires côté primaire :

• Pertes par connexion P_{con1} :

$$P_{con1} = R_{con1} \times I_{Ph1}^2 \text{ [W]}$$

$$R_{con1} = \frac{\rho_t \times L_{con1}}{S_{1n}} \text{ [} \Omega \text{]}$$

$$L_{con1} = 7.5 \times h_{b1} \text{ [cm]}$$

$$L_{con1} = 7.5 \times 43.78$$

$$L_{con1} = 328.35 \text{ cm}$$

$$R_{con1} = \frac{0.0198 \times 328.35 \times 10^{-2}}{2.54}$$

$$R_{con1} = 0.0256$$

$$P_{con1} = 0.0256 \times \left(12.12 \frac{1}{3}\right)^2$$

$$P_{con1} = 1.25 \text{ W}$$

- **Pertes par effet pelliculaire P_{sup1} :**

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

$$P_{sup1} = (K_{mr1} - 1) \times R_1 \times m \times I_{Ps1}^2 \text{ [W]}$$

- K_{mr1} : Coefficient de majoration de la résistance en courant alternatif. Pour un conducteur rond ce coefficient est donné par la relation suivante :

$$K_{mr1} = 1 + \frac{N_{c1}^2 - 0.2}{9} \times (\alpha_1 d_{1n})^4$$

- m: nombre de phases.
- N_{c1} : Nombre de couches secondaires égal à 233 couches.

$$\alpha_1 = \frac{N_{s1} \times d_{1n} \times \mu_0 \times \omega}{2h_{m1} \times \rho_t}$$

- d_{1n} : Diamètre du fil normalisé.
- h_{m1} : Hauteur magnétique.
- N_{s1} : Nombre de spires par couche.
- ω : Pulsation du réseau égale à $2\pi f$ où f est la fréquence.
- μ_0 : Perméabilité magnétique du vide.

$$\alpha_1 = \frac{233 \times 1.8 \times 10^{-3} \times 4 \times 3.14 \times 10^{-7} \times 2\pi \times 50}{2 \times 500.5 \times 10^{-3} \times 0.0198 \times 10^{-6}}$$

$$\alpha_1 = 91.35$$

$$K_{mr1} = 1 + \frac{14^2 - 0.2}{9} \times (91.35 \times 1.8 \times 10^{-3})^4$$

$$K_{mr1} = 1.015$$

$$P_{\text{sup1}} = (1.015 - 1) \times 24.37 \times 3 \times \left(\frac{12.12}{3}\right)^2$$

$$P_{\text{sup1}} = 53.7 \text{ W}$$

h- Pertes totales en charge côté primaire P_{CC1} :

$$P_{CC1} = P_{cc1} + P_{con1} + P_{\text{sup1}} \text{ [W]}$$

$$P_{CC1} = 3848.52 + 1.25 + 53.7$$

$$P_{CC1} = 3903.47 \text{ W}$$

4-2-2-3 : Pertes joules totales P_{cc} :

$$P_{cc} = P_{cc1} + P_{cc2} \text{ [W]}$$

$$P_{cc} = 3903.47 + 3915.4$$

$$P_{cc} = 7818.87 \text{ W}$$

• Poids total du cuivre :

$$G_c = m \times (G_{c1} + G_{c2}) \text{ [kg]}$$

$$G_c = 3 \times (70.68 + 37.83)$$

$$G_c = 325.53 \text{ kg}$$

4-3 : Calcul définitif de la tension de court-circuit U_{cc} :

La valeur de la composante réactive de la tension de court-circuit est connue d'après les résultats du chapitre 3, on peut alors déterminer la valeur de la tension de court-circuit.

• Calcul de la composante active U_{cca} :

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

$$U_{cca} = \frac{7818.87}{630 \times 10^3} \times 100$$

$$U_{cca} = 1.24\%$$

• La valeur de la composante réactive étant donnée U_{ccr} est calculée au chapitre 3.

$$U_{ccr} = 5.98\%$$

Alors :

$$U_{cc} = \sqrt{U_{cca}^2 + U_{ccr}^2}$$

$$U_{cc} = \sqrt{5.98^2 + 1.24^2}$$

$$U_{CC} = 6,1\%$$

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

$$\frac{U_{CC}}{U_{ncc}} = \frac{U_{ncc} - U_{CC}}{U_{ncc}} \times 100 \text{ [%]}$$

- U_{ncc} : la valeur de la tension de court-circuit donnée par le cahier des charges qui est de 6%.

$$\frac{U_{CC}}{U_{ncc}} \times 100 = \frac{6.1 - 6}{6} \times 100$$

$$\frac{U_{CC}}{U_{ncc}} = 1.66\%$$

4-4 : Calcul du rendement :

Le rendement est donné par la relation suivante :

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \alpha^2 \times P_{CC}}{\alpha S_n \cos \varphi_2 + P_0 + \alpha^2 P_{CC}} \times 100$$

$$\alpha = \frac{P_0}{P_{CC}}$$

$$\alpha = \frac{1441.74}{781887}$$

$$\alpha = 0.429$$

Alors :

- $\cos \varphi = 1$:

$$\eta = 1 - \frac{1441.74 + (781887 \times 0.429^2)}{630 \times 10^3 + 1441.74 + 0.429^2 \times 781887}$$

$$= 99.54 \%$$

- $\cos \varphi = 0.8$:

$$\eta = 1 - \frac{1441.74 + (781887 \times 0.429^2)}{0.8 \times 63010^3 + 1441.74 + 0.429^2 \times 781887}$$

$$= 99.43 \%$$

4- 5 : Calcul de la chute de tension U :

La variation de la tension est donnée par la formule suivante :

$$U \% = \alpha(U_{cca}\cos\varphi_2 + U_{ccr}\sin\varphi_2)$$

a- Cas d'une charge résistive : $\cos \varphi_2 = 1$ et $\sin\varphi_2 = 0$

$$U \% = 0.429 \times 1.24 \times 1$$

$$U \% = 0.53 \%$$

Calcul de: U :

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

$$U = \frac{3300 \times 0.53}{100}$$

$$U = 17.5 \text{ V}$$

b- Cas d'une charge inductive : $\cos\varphi = 0.8$ et $\sin\varphi = 0.6$:

$$U\% = 0.429(1.24 \times 0.8 + 5.98 \times 0.6)$$

$$U\% = 1.86 \%$$

Calcul de U :

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

$$U = \frac{3300 \times 1.86}{100}$$

$$U = 61.38 \text{ V}$$

c- Cas d'une charge capacitive : $\cos\varphi = 1$ et $\sin\varphi = -0.6$:

$$U\% = 0.429(1.24 \times 1 + 5.98 \times -0.6)$$

$$U\% = -1 \%$$

Calcul de U :

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

$$U = \frac{|3300 \times -1|}{100}$$

$$U = 33 V$$

4-6 : Calcul du courant à vide :

Le courant à vide I_0 est obtenu lorsque le secondaire du transformateur est ouvert et le primaire est alimenté par sa tension nominale.

Le courant à vide comporte une composante réactive destinée essentiellement à l'excitation du circuit magnétique (courant magnétique), et une composante active correspondant aux pertes à vide. Le courant à vide est exprimé en pourcentage du courant nominal.

La valeur du courant à vide est donnée par la relation suivante :

$$\frac{I_{10}}{I_{n1}} = \frac{G_{fer} \times P_{01.5} \times k_{ks} \times k_{ws} \times k_{bs}}{S_n} \times 100 \text{ [%]}$$

- G'_{fer} : 651.77 kg.
- $P'_{01.5}$: 3.45 w.
- K_{ks} : facteur de forme du noyau en fonction du diamètre de la colonne = 1.
- K_{ws} : facteur de forme de la bobine = 1 (circulaire).
- K_{bs} : 2.843 pour $B_c = 1.71$ T.

$$\frac{I_{10}}{I_{n1}} = \frac{651.77 \times 3.45 \times 1 \times 1 \times 2.843}{630 \times 10^3} \times 100$$

$$\frac{I_{10}}{I_{n1}} = 1.01 \%$$

Chapitre 5

Calculs thermiques



5-1 : Introduction :

Lors de son fonctionnement, le transformateur est le siège de pertes d'énergie qui sont localisées dans deux éléments principaux :

- Le circuit magnétique : dans ce cas les pertes sont dues à la variation du flux alternatif dans les tôles magnétiques.
- Les enroulements : dans lesquels les pertes sont dues en grande partie à l'effet Joule.

Ces pertes qui se dégagent dans le noyau et dans les enroulements 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 (huile), par rayonnement (ondes électromagnétiques).

5-2 : Echauffement du circuit magnétique : [5,4]

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.

$$X = 0.9 \times D \text{ [cm]} \text{ et } Y = \frac{S_{fer}}{X} \text{ [cm]}$$

Avec :

- X : la longueur du rectangle.
- D : le diamètre de la colonne.
- Y : la largeur du rectangle.
- S_{fer} : la section de la colonne.

$$X = 0.9 \times 19.4$$

$$X = 17.46 \text{ cm}$$

$$Y = \frac{261}{17.46}$$

$$Y = 14.95 \text{ cm}$$

5-2-1 : Echauffement maximal du circuit magnétique par rapport à la surface dans la direction longitudinale :

$$\theta_1 = \frac{P \times X^2}{\varepsilon \times \lambda_1} \text{ [C}^\circ\text{]}$$

- λ_1 : Conductivité thermique longitudinale (W /m °C).

- P : Pertes spécifiques des tôles par unité de volume données par la relation suivante :

$$P = P_{sp} \times \rho_{fer} \quad [\text{W/m}^3]$$

- ρ_{fer} : Masse volumique des tôles.
 ➤ P_{sp} : Pertes spécifiques par unité de masse.

$$P_{sp} = 1.5 \times K_{BP} \quad [\text{W/kg}]$$

$$P_{sp} = 0.97 \times 1.504$$

$$P_{sp} = 1.4588 \text{ W/kg}$$

$$P = 1.4588 \times 7650$$

$$P = 11159.82 \text{ W}$$

$$\text{Donc: } \theta_1 = \frac{11159.82 \times (17.46 \times 10^{-2})^2}{8 \times 20}$$

$$\theta_1 = 2.12 \text{ }^\circ\text{C}$$

5-2-2: Echauffement maximal du circuit magnétique par rapport à la surface dans la direction transversale :

$$\theta_1 = \frac{P \times Y^2}{8 \times \lambda_t} \quad [^\circ\text{C}]$$

- λ_t : Conductivité thermique transversale $\text{W/m}^\circ\text{C}$

$$\theta_1 = \frac{11159.82 \times (14.95 \times 10^{-2})^2}{8 \times 3}$$

$$\theta_1 = 10.39 \text{ }^\circ\text{C}$$

5-2-3 : Différence de température entre la surface du circuit magnétique et l'huile dans la direction longitudinale :

$$\theta_2 = \frac{P \times X}{2 \times \alpha_{con}} \quad [^\circ\text{C}]$$

- α_{con} coefficient de convection de l'huile, sa valeur est comprise entre 100 et 110 $\text{W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$

On prend $\alpha_{con} = 110$

$$\text{Donc : } \theta_2 = \frac{11159.82 \times 17.46 \times 10^{-2}}{2 \times 110}$$

$$\theta_2 = 8.85 \text{ }^\circ\text{C}$$

5-2-4 : Différence de température entre la surface du circuit magnétique et l'huile dans la direction transversale :

$$\theta_2 = \frac{P \times Y}{2 \times \alpha_{con}} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\theta_2 = \frac{11159.82 \times 14.95 \times 10^{-2}}{2 \times 110}$$

$$\theta_2 = 7.58^\circ\text{C}$$

5-2-5 : Echauffement maximal du circuit magnétique dans la direction longitudinale :

$$\theta_{1max} = \theta_1 + \theta_2 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\theta_{1max} = 2.12 + 8.85$$

$$\theta_{1max} = 10.97^\circ\text{C}$$

5-2-6 : Echauffement maximal du circuit magnétique dans la direction transversale :

$$\theta_{2max} = \theta_1 + \theta_2 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\theta_{2max} = 10.39 + 7.58$$

$$\theta_{2max} = 17.97^\circ\text{C}$$

D'où l'échauffement moyen résultant du circuit magnétique par rapport à l'huile est :

$$\theta_{max} \quad h = \theta_{2max} - \frac{\theta_2 + 1.5\theta_1}{\theta_{2max} + \theta_2 + 1.5\theta_1}$$

$$\theta_{max} = 17.97 - \frac{7.58 + (1.5 \times 10.39)}{17.97 + 7.58 + (1.5 \times 10.39)}$$

$$\theta_{max} \quad h = 17.4^\circ\text{C}$$

5-3 : Echauffement dans les enroulements : [5,7]:

5-3-1 : Echauffement moyen de l'enroulement secondaire par rapport à l'huile :

Le diamètre intérieur et extérieur de l'enroulement secondaire :

$$D_{i2} = 21 \text{ cm et } D_{ex2} = 25.2 \text{ cm}$$

Le nombre de cales utilisées est donné par le tableau 5-1 :

Tableau 5-1.

Diamètre extérieur [mm]	150-250	250-380	380-500	500-600	900-1200
N nombre de cales	6	8	10	12	14-16

Nous prenons le nombre des cales égales à 8 car on a $D_{ex2} = 25.2$ cm.

a- Calcul de la surface intérieure de l'enroulement en contact avec l'huile :

- **La surface intérieure de l'enroulement :**

$$S_{i2} = \pi \times D_{i2} \times h_{B2} \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$S_{i2} = 3.14 \times 21 \times 45.05$$

$$S_{i2} = 2970.6 \text{ cm}^2$$

- **La surface intérieure de l'enroulement en contact avec l'huile :**

$$S_{i2}K_{i2} = S_{i2} \times K_{i2} \text{ [cm}^2\text{]}$$

K_{i2} : Le coefficient tenant compte de la surface intérieure de l'enroulement occupée par les cales est donné par la formule suivante :

$$K_{i2} = \frac{\pi \times D_{i2} - (N_{cal} \times L_{cal})}{\pi \times D_{i2}}$$

$$K_{i2} = \frac{(3.14 \times 21) - (8 \times 0.5)}{3.14 \times 21}$$

$$K_{i2} = 0.94$$

La surface intérieure en contact avec l'huile est :

$$S_{i2}K_{i2} = 0.94 \times 2970.6$$

$$S_{i2}K_{i2} = 2792.36 \text{ cm}^2$$

b- Calcul de la surface extérieure de l'enroulement en contact avec l'huile :

- **La surface extérieure de l'enroulement :**

$$S_{ex2} = \pi \times D_{ex2} \times h_{B2} \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$S_{ex2} = 3.14 \times 25.2 \times 45.05$$

$$S_{ex2} = 3564.7 \text{ cm}^2$$

- **La surface extérieure de l'enroulement en contact avec l'huile :**

$$S_{ex2}K_{ex2} = S_{ex2} \times K_{ex2} \text{ [cm}^2\text{]}$$

- K_{ex2} : Le coefficient tenant compte de la surface intérieure de l'enroulement occupée par les cales est donnée par la formule suivante :

$$K_{ex2} = \frac{(\pi \times D_{ex2}) - (N_{cal} \times L_{cal})}{\pi \times D_{ex2}}$$

$$K_{ex2} = \frac{(3.14 \times 25.2) - (8 \times 0.5)}{3.14 \times 25.2}$$

$$K_{ex2} = 0.95$$

La surface extérieure en contact avec l'huile est :

$$S_{ex2} K_{ex2} = 3564.7 \times 0.95$$

$$S_{ex2} K_{ex2} = 3386.46 \text{ cm}^2$$

c- Calcul de la conductivité résultante de l'enroulement :

$$res = \frac{\lambda_i \times L}{2 \times 2L_i (m_c^2 - 1)} \text{ [W/m } ^\circ\text{C]}$$

- λ_i : Conductivité du papier égale à 0.2 W/m °C.
- $2L_i$: Epaisseur de l'isolation du conducteur égale à 0.45mm
- L : Epaisseur de l'enroulement sans isolation.
- m_c : Nombre de couches.

$$L = a_2 - 2L_i \text{ [mm]}$$

$$L = 21 - 0.45$$

$$L = 20.55 \text{ mm}$$

$$res = \frac{0.2 \times 20.55 \times 10^{-3}}{0.45(2^2 - 1)10^{-3}}$$

$$res = 9.13 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

d- Calcul des résistances thermiques de l'isolation périphérique :

- Intérieure :

$$R_{i2} = \frac{L_i}{\lambda_i \times S_{i2} K_{i2}} + \frac{1}{\alpha_{con} \times S_{i2} k_{i2}} \text{ [}^\circ\text{C/W]}$$

$$R_{i2} = \frac{0.225 \times 10^{-3}}{0.2 \times 2792.36 \times 10^{-4}} + \frac{1}{110 \times 2792.36 \times 10^{-4}}$$

$$R_{i2} = 0.036 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

- Extérieure :

$$R_{ex2} = \frac{L_i}{\lambda_i \times S_{ex2} K_{ex2}} + \frac{1}{\alpha_{con} \times S_{ex2} k_{ex2}} \text{ [}^\circ\text{C/W]}$$

$$R_{ex2} = \frac{0.225 \times 10^{-3}}{0.2 \times 3386.46 \times 10^{-4}} + \frac{1}{110 \times 3386.46 \times 10^{-4}}$$

$$R_{ex2} = 0.030 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

e- Distance à laquelle la température est maximale :

$$X=L \times \frac{R_{ex2}S_{ex2} + \frac{L}{2\lambda_{res}}}{R_{i2}S_{i2} + R_{ex2}S_{ex2} + \frac{L}{\lambda_{res}}} \quad [\text{m}]$$

$$X=20.55 \times 10^{-3} \times \frac{0.03 \times 3564.7 \times 10^{-4} + \frac{20.55 \times 10^{-3}}{2 \times 9.13}}{0.036 \times 2970.6 \times 10^{-4} + 0.03 \times 3564.7 \times 10^{-4} + \frac{20.55 \times 10^{-3}}{9.13}}$$

$$X=0.01 \text{ m}$$

$$X=10 \text{ mm}$$

$$(L-X) = 20.55 - 10$$

$$(L-X) = 10.55 \text{ mm}$$

f- Calcul des flux thermiques :

- Calcul du rapport des flux i :

$$i = \frac{P_{ex2}}{P_{i2}} = \frac{(L-x) \times S_{ex2}}{X \times S_{i2}}$$

$$i = \frac{10.55 \times 3564.7}{10 \times 2970.6}$$

$$i=1.26$$

- Le flux thermique qui traverse la surface S_{ex2} k_{ex2} :

$$P_{ex2} = \frac{P_{cu}}{1+i} \quad [\text{W}]$$

$$\text{Avec : } P_{cu} = \frac{p_{cc2}}{3}$$

➤ P_{CC2} : pertes joule dans l'enroulement secondaire.

➤ P_{cu} : pertes joules dans la bobine.

$$P_{cu} = \frac{3915.4}{3}$$

$$P_{cu} = 1305.13 \text{ W}$$

$$P_{ex2} = \frac{1305.13}{1+1.26}$$

$$P_{ex2} = 727.64 \text{ W}$$

- Flux thermique qui traverse la surface interne :

$$P_{i2} = \frac{P_{cu}}{i+1} \text{ [W]}$$

$$P_{i2} = \frac{1305.13}{1.26+1}$$

$$P_{i2} = 577.49 \text{ W}$$

g- Calcul des résistances thermiques :

- Intérieure :

$$R_{ii2} = \frac{X}{2\lambda_{res} \times S_{i2} k_{i2}} \text{ [}^\circ\text{C/W]}$$

$$R_{ii2} = \frac{10 \times 10^{-3}}{2 \times 9.13 \times 2792.36 \times 10^{-4}}$$

$$R_{ii2} = 1.96 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C/W}$$

- Extérieure :

$$R_{iex2} = \frac{L-X}{2\lambda_{res} \times S_{ex2} k_{ex2}} \text{ [}^\circ\text{C/W]}$$

$$R_{iex2} = \frac{10.55 \times 10^{-3}}{2 \times 4.36 \times 3386.46 \times 10^{-4}}$$

$$R_{iex2} = 1.7 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C/W}$$

h- Calcul de la température maximale de l'enroulement :

- Intérieure :

$$\theta_{max2} = P_{i2}(R_{i2} + R_{ii2}) \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\theta_{max2} = 577.49 \times (0.036 + (1.96 \times 10^{-3}))$$

$$\theta_{max2} = 21.92 \text{ }^\circ\text{C}$$

- Extérieure :

$$\theta_{max2} = P_{ex2}(R_{ex2} + R_{iex2}) \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\theta_{max2} = 727.64 \times (0.03 + (1.7 \times 10^{-3}))$$

$$\theta_{max2} = 23.06 \text{ }^\circ\text{C}$$

i- Calcul des températures de l'enroulement :

- **Intérieure :**

$$\theta_{i2} = P_{i2} \times R_{ii2} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\theta_{i2} = 577.49 \times 1.96 \times 10^{-3}$$

$$\theta_{i2} = 1.13 \text{ }^\circ\text{C}$$

- **Extérieure :**

$$\theta_{ex2} = P_{ex2} \times R_{iex2} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\theta_{ex2} = 727.64 \times 1.7 \times 10^{-3}$$

$$\theta_{ex2} = 1.23 \text{ }^\circ\text{C}$$

La température moyenne de l'enroulement secondaire par rapport à l'huile est :

$$\theta_{moy2} = \theta_{max2} - \frac{i \times (\theta_{ex2} + \theta_{i2})}{3 \times (i+3)} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\theta_{moy2} = 21.92 - \frac{1.26(1.23+1.13)}{3(1.26+3)}$$

$$\theta_{moy2} = 21.68 \text{ }^\circ\text{C}$$

5-3-2 : Echauffement moyen dans l'enroulement primaire par rapport à l'huile :

Le diamètre intérieur et extérieur de l'enroulement primaire :

$$D_{i1} = 29.4 \text{ cm et } D_{ex1} = 36.4 \text{ cm}$$

a- Calcul de la surface intérieure de l'enroulement en contact avec l'huile :

- **La surface intérieure de l'enroulement :**

$$S_{i1} = \pi \times D_{i1} \times h_{B1} \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$S_{i1} = 3.14 \times 29.4 \times 43.78$$

$$S_{i1} = 4041.6 \text{ cm}^2$$

- **La surface intérieure de l'enroulement en contact avec l'huile :**

$$S_{i1} K_{i1} = S_{i1} \times K_{i1} \text{ [cm}^2\text{]}$$

- K_{i1} : Le coefficient tenant compte de la surface intérieure de l'enroulement occupée par les cales est donné par la formule suivante :

$$K_{i1} = \frac{\pi \times D_{i1} - (N_{cal} \times L_{cal})}{\pi \times D_{i1}}$$

$$N_{cal} = \frac{D_{moy}}{M} ; \text{ Avec } M=30 \text{ mm}$$

$$N_{cal} = \frac{29.4+36.4}{3}$$

$$N_{cal} = 11 \text{ cales}$$

$$K_{i1} = \frac{(3.14 \times 29.4) - (11 \times 0.5)}{3.14 \times 29.4}$$

$$K_{i1} = 0.94$$

La surface intérieure en contact avec l'huile :

$$S_{i1}K_{i1} = 4041.6 \times 0.94$$

$$S_{i1}K_{i1} = 3799.1 \text{ cm}^2$$

b- Calcul de la surface extérieure de l'enroulement en contact avec l'huile :

- **La surface extérieure de l'enroulement :**

$$S_{ex1} = \pi \times D_{ex1} \times h_{B1} \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$S_{ex1} = 3.14 \times 36.4 \times 43.78$$

$$S_{ex1} = 5003.87 \text{ cm}^2$$

- **La surface extérieure de l'enroulement en contact avec l'huile :**

$$S_{ex1}K_{ex1} = S_{ex1} \times K_{ex1} \text{ [cm}^2\text{]}$$

- K_{ex1} : Le coefficient tenant compte de la surface intérieure de l'enroulement occupée par les cales est donnée par la formule suivante :

$$K_{ex1} = \frac{(\pi \times D_{ex1}) - (N_{cal} \times L_{cal})}{\pi \times D_{ex1}}$$

$$K_{ex1} = \frac{(3.14 \times 36.4) - (11 \times 0.5)}{3.14 \times 36.4}$$

$$K_{ex1} = 0.96$$

La surface extérieure en contact avec l'huile est :

$$S_{ex1}K_{ex1} = 5003.87 \times 0.96$$

$$S_{ex1}K_{ex1} = 4753.67 \text{ cm}^2$$

c- Calcul de la conductivité résultante de l'enroulement :

$$res = \frac{\lambda_v \times L}{(2L_i + d_i) \times (m_c - 1)} \text{ [W/m}^\circ\text{C]}$$

- λ_v : Conductivité du vernis égale à 0.17W/m°C.
- $2L_i + d_i$: Epaisseur de l'isolation du conducteur égale à 0.2 + 0.088 mm
- L : Epaisseur de l'enroulement sans isolation.
- m_c : Nombre de couches.

$$L = a_1 - (2L_i + d_i) \text{ [mm]}$$

$$L = 35 - 0.288$$

$$L = 34.712 \text{ mm}$$

$$res = \frac{0.17 \times 34.712 \times 10^{-3}}{0.288(14-1)10^{-3}}$$

$$res = 1.57 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

d- Calcul des résistances thermiques de l'isolation périphérique :

• Intérieure :

$$R_{i1} = \frac{L_i}{\lambda_i \times S_{i1}} + \frac{1}{\alpha_{con} \times S_{i1}} \text{ [}^\circ\text{C/W]}$$

$$R_{i1} = \frac{0.144 \times 10^{-3}}{0.17 \times 4041.6 \times 10^{-4}} + \frac{1}{110 \times 4041.6 \times 10^{-4}}$$

$$R_{i1} = 0.024 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

• Extérieure :

$$R_{ex1} = \frac{L_i}{\lambda_i \times S_{ex1}} + \frac{1}{\alpha_{con} \times S_{ex1}} \text{ [}^\circ\text{C/W]}$$

$$R_{ex1} = \frac{0.144 \times 10^{-3}}{0.17 \times 5003.87 \times 10^{-4}} + \frac{1}{110 \times 5003.87 \times 10^{-4}}$$

$$R_{ex1} = 0.018 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

e- Distance à laquelle la température est maximale :

$$X = L \times \frac{R_{ex1} S_{ex1} + \frac{L}{2\lambda_{res}}}{R_{i1} S_{i1} + R_{ex1} S_{ex1} + \frac{L}{\lambda_{res}}} \text{ [m]}$$

$$X = 34.712 \times 10^{-3} \times \frac{0.018 \times 5003.87 \times 10^{-4} + \frac{34.712 \times 10^{-3}}{2 \times 1.57}}{0.024 \times 4041.6 \times 10^{-4} + 0.018 \times 5003.87 \times 10^{-4} + \frac{34.712 \times 10^{-3}}{1.57}}$$

$$X=0.017 \text{ m} \quad X=17 \text{ mm}$$

$$(L-X) = 34.712-17$$

$$(L-X) = 17.712 \text{ mm}$$

f- Calcul des flux thermiques :

- Calcul du rapport des flux i :

$$i = \frac{P_{ex1}}{P_{i1}} = \frac{(L-x) \times S_{ex1}}{X \times S_{i1}}$$

$$i = \frac{17.712 \times 5003.87}{17 \times 4041.6}$$

$$i = 1.29$$

- Le flux thermique qui traverse la surface S_{ex2} k_{ex2} :

$$P_{ex1} = \frac{P_{cc1}}{3(1+\frac{1}{i})} \text{ [W]}$$

➤ P_{CC1} : pertes joule dans l'enroulement primaire.

$$P_{ex1} = \frac{3903.47}{3(1+\frac{1}{1.29})}$$

$$P_{ex1} = 732.96 \text{ W}$$

- Flux thermique qui traverse la surface interne :

$$P_{i1} = \frac{P_{cc1}}{3(i+1)} \text{ [W]}$$

$$P_{i1} = \frac{3903.47}{3(1+1.29)}$$

$$P_{i1} = 568.19 \text{ W}$$

g- Calcul des résistances thermiques :

- Intérieure :

$$R_{ii1} = \frac{X}{2\lambda_{res} \times S_{i1} K_{i1}} \text{ [}^\circ\text{C/W]}$$

$$R_{ii1} = \frac{17 \times 10^{-3}}{2 \times 1.57 \times 3799.1 \times 10^{-4}}$$

$$R_{ii2} = 0.014 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

- Extérieure :

$$R_{iex1} = \frac{L-X}{2\lambda_{res} \times S_{ex1} k_{ex1}} \text{ [}^\circ\text{C/W]}$$

$$R_{iex1} = \frac{17.712 \times 10^{-3}}{2 \times 1.57 \times 4753.57 \times 10^{-4}}$$

$$R_{ex1} = 0.011 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

h- Calcul de la température maximale de l'enroulement :

- Intérieure :

$$\theta_{max1} = P_{i1}(R_{i1} + R_{ii1}) \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\theta_{max1} = 568.19 \times (0.024 + 0.014)$$

$$\theta_{max1} = 21.59 \text{ }^\circ\text{C}$$

- Extérieure :

$$\theta_{max} = P_{ex1}(R_{ex1} + R_{iex1}) \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\theta_{max} = 732.96 \times (0.018 + 0.011)$$

$$\theta_{max} = 21.25 \text{ }^\circ\text{C}$$

i- Calcul des températures de l'enroulement :

- Intérieure :

$$\theta_{i1} = P_{i1} \times R_{ii1} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\theta_{i1} = 568.19 \times 0.014$$

$$\theta_{i1} = 7.95 \text{ }^\circ\text{C}$$

- Extérieure :

$$\theta_{ex1} = P_{ex1} \times R_{iex1} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\theta_{ex1} = 732.96 \times 0.011$$

$$\theta_{ex1} = 8.06 \text{ }^\circ\text{C}$$

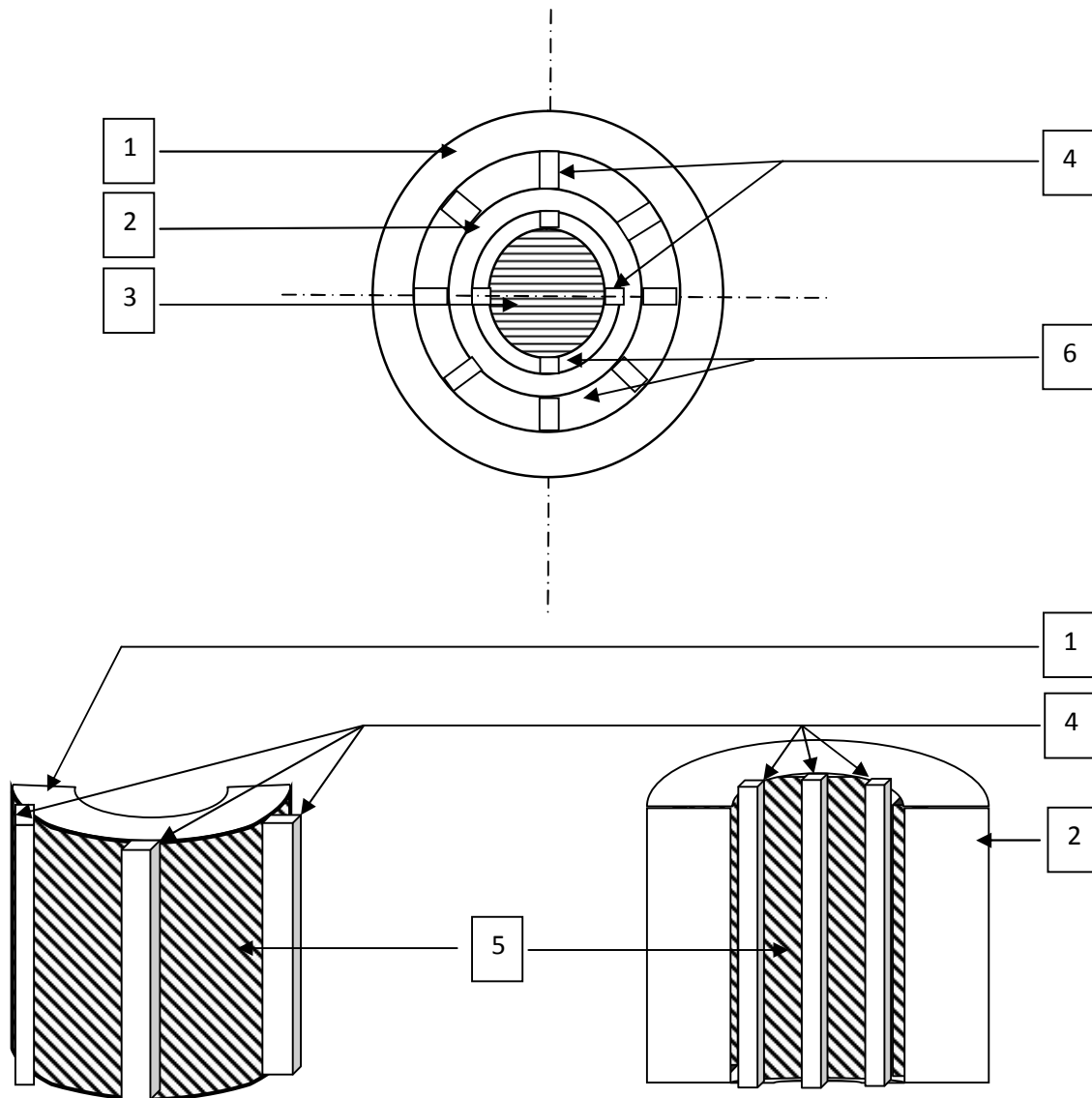
La température moyenne de l'enroulement secondaire par rapport à l'huile est :

$$\theta_{moy1} = \theta_{max1} - \frac{i \times (\theta_{ex1} + \theta_{i1})}{3 \times (i+3)} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\theta_{moy1} = 21.25 - \frac{1.29 \times (7.95 + 8.06)}{3(1.29+3)}$$

$$\theta_{\text{moy1}}^{\text{h}} = 19.64^{\circ}\text{C}$$

Les figures 5-1 et 5-2 illustrent les surfaces en contact avec l'huile ainsi que l'évolution du transfert de chaleur dans les enroulements du transformateur.



1. Enroulement primaire
2. Enroulement secondaire
3. Noyau
4. Cales
5. Surfaces en contact avec l'huile
6. Canales

Figure5-1 : présentation des enroulements et des surfaces en contact avec l'huile.

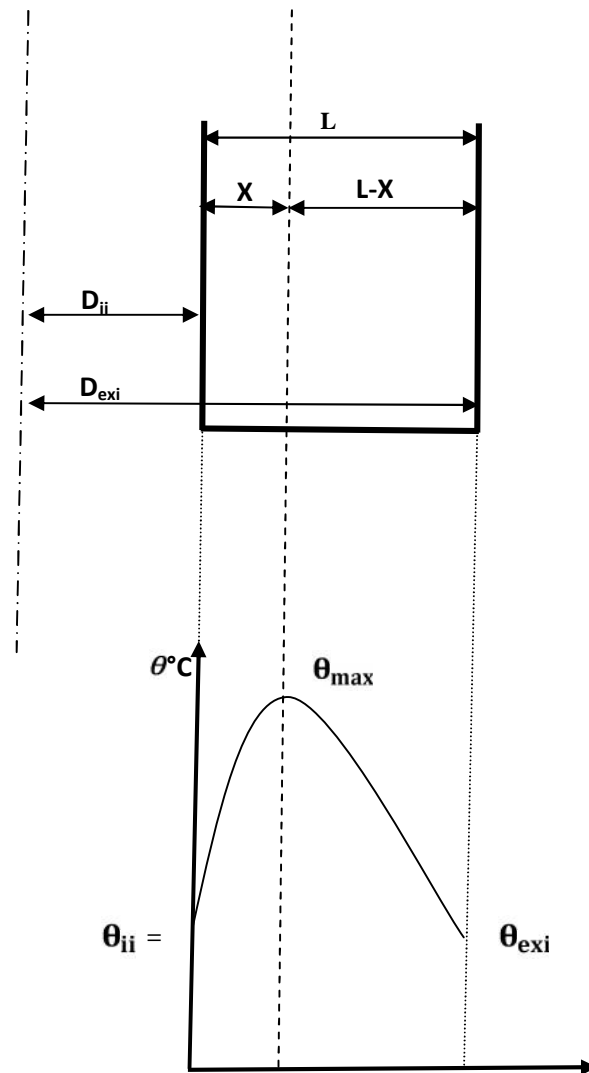


Figure 5-2 : transmission de chaleur dans un enroulement.

Chapitre 6

Dimensionnement de la cuve



6-1 : 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 fortement lié au calcul thermique du transformateur, elle doit présenter une grande surface d'échange avec le milieu extérieur [6].

6-2 : Paramètres géométriques :**6-2-1 : Longueur de la cuve L :**

$$L=2E_c + D_{ex1} + 2x \text{ [mm]}$$

➤ x:distance d'isolation de l'enroulement par rapport à la cuve.

Pour U =30 kV, la norme exige x=40mm.

$$L= (2 \times 394) + 364 + (2 \times 40)$$

$$L=1232\text{mm}$$

On prend :

$$L=1240\text{mm}$$

6-2-2 : Largueur de la cuve :

$$L_c=D_{ex1} + 2x+y \text{ [mm]}$$

➤ y:distance entre la cuve et les prises.

Pour U =30 kV, la norme exige y=25mm.

$$L_c=364+ (2 \times 40) + 25$$

$$L_c=469 \text{ mm}$$

On prend :

$$L_c = 470\text{mm}$$

6-2-3 : Hauteur de la cuve :

$$H_{cv}=H_n + f_{sco} + d \text{ [mm]}$$

➤ f_{sco} : Espace pour le branchement égal à 205 mm.

➤ d : largeur de la cale d'appui égale à 30mm.

➤ H_n : Hauteur du noyau.

$$H_{cv} = 860.5 + 205 + 30$$

$$H_{cv} = 1095.5 \text{ mm}$$

On prend :

$$H_{cv} = 1100 \text{ mm}$$

6-3 : Choix des démentions des ondulations :

Pour un meilleur dégagement de chaleur, il faut que les ondulations dépassent le niveau des bobines vers le bas.

D'après les calculs imposés pour la cuve, nous avons fixé la hauteur des ondulations à 900 mm tout le long des quatre faces de la cuve.

- **Température de cuivre :**

- $\theta_{moy2/h} = 21.68^\circ\text{C}$: l'élévation moyenne de la température du cuivre par rapport à l'huile côté secondaire.
- $\theta_{moy1/h} = 19.64^\circ\text{C}$: l'élévation moyenne de la température du cuivre par rapport à l'huile côté primaire.

La température moyenne finale du cuivre par rapport à la température ambiante maximale de 50°C est de 105°C .

- $\theta_{moy\text{cu}} = 105^\circ\text{C}$: température finale moyenne du cuivre.
- $\theta_{max\text{cu}} = 55 + 10 = 115^\circ\text{C}$: température finale maximale du cuivre.

La figure 6-1 donne un diagramme des températures atteintes dans le cuivre, durant les phases de son fonctionnement.

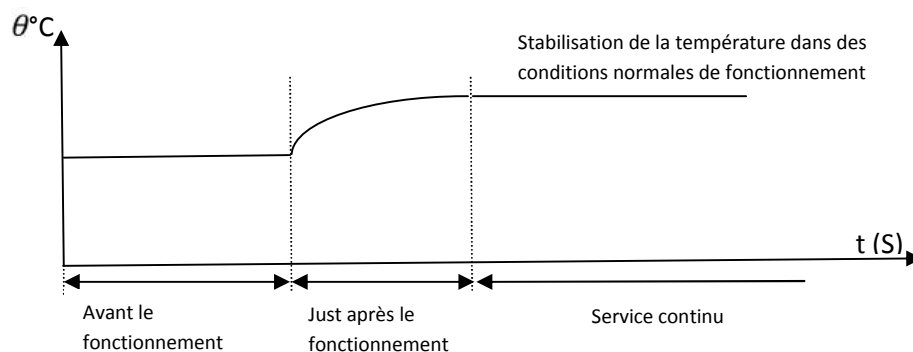


Figure 6-1 : Courbes des différentes températures des conducteurs en cuivre.

- **Température de l'huile :**

Pour l'huile, il faut atteindre une élévation maximale de 50°C, donc une température finale de 100°C.

$\theta_{maxh}=50^\circ\text{C}$: l'élévation maximale de la température d'huile par rapport à la température ambiante.

$$\theta_{moyh} = \frac{\theta_{maxh}}{1.2} [^\circ\text{C}]$$

$$\theta_{moyh} = \frac{50}{1.2}$$

$$\theta_{maxh} = 41.66^\circ\text{C}$$

6-3-1: Calcul de l'élévation moyenne de la température de l'huile :

- **Côté secondaire :**

$$\theta_{2moyh} = \theta_{moycu} - \theta_{moy2/h} [^\circ\text{C}]$$

θ_{moycu} : Température moyenne du cuivre.

$$\theta_{2moyh} = 55 - 21.68$$

$$\theta_{2moyh} = 33.32^\circ\text{C}$$

- **Côté primaire :**

$$\theta_{1moyh} = \theta_{moycu} - \theta_{moy1/h} [^\circ\text{C}]$$

$$\theta_{1moyh} = 55 - 19.68$$

$$\theta_{1moyh} = 35.32^\circ\text{C}$$

D'où l'élévation maximale de température de l'huile :

- **Côté secondaire :**

$$\theta_{2maxh} = \theta_{2moyh} \times 1.2 [^\circ\text{C}]$$

$$\theta_{2maxh} = 33.32 \times 1.2$$

$$\theta_{2maxh} = 40^\circ\text{C}$$

- **Côté primaire :**

$$\theta_{1\max h} = \theta_{1\text{moyh}} \times 1.2 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\theta_{1\max h} = 35.32 \times 1.2$$

$$\theta_{1\max h} = 42.4^\circ\text{C}$$

Pour déterminer le nombre d'ondulations, on doit calculer les pertes à dissiper par la cuve au niveau de parties fonctionnelles, leur valeur est donnée par la formule suivante:

$$P_{55} = (P_0 + 1.06 p_{cc}) \times m \text{ [W]}$$

- 1.06 : facteur permettant de ramener les pertes cuivre à la température de référence qui est de 75°C.
- P_{55} : Pertes à dissiper par la cuve à la température 55°C (température de référence) .
- 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 $\theta_{\max h}$ qui est de 42.4°C, donc une élévation moyenne de température d'huile.

$$\theta_{\text{moyh}} = \frac{\theta_{\max h}}{1.2} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\theta_{\text{moyh}} = \frac{42.4}{1.2}$$

$$\theta_{\text{moyh}} = 35.33^\circ\text{C}$$

$$m = \left(\frac{55}{\theta_{\max h}} \right)^{\frac{1}{0.7}}$$

$$m = \left(\frac{55}{42.4} \right)^{\frac{1}{0.7}}$$

$$m = 1.45$$

$$P_{55} = (1441.74 + (1.06 \times 7818.87)) \times 1.45$$

$$P_{55} = 14108 \text{ W}$$

6-3-2 : Détermination du nombre d'ondulations :

- $L = 1240 \text{ mm}$ (longueur de la cuve).
- $L_c = 470 \text{ mm}$ (largeur de la cuve).

a- côté longueur de la cuve :

$$L = n_1 40 + 2e_{w1} \text{ [mm]}$$

- n_1 : Nombre entre axes des ondulations coté longueur.
- N_1 : Nombre d'ondulation coté longueur.

$$N_1 = n_1 + 1$$

$$n_1 = \frac{l - 2e_{w1}}{40} \text{ [mm]}$$

Avec $e_{w1} = 20$ mm

$$n_1 = \frac{1240 - 2 \times 20}{40}$$

$$n_1 = 30$$

$$N_1 = 30 + 1$$

$$N_1 = 31$$

Correction de e_{w1} :

$$e_{w1} = \frac{l - n_1 \cdot 40}{2} \text{ [mm]}$$

$$e_{w1} = \frac{1240 - (30 \times 40)}{2}$$

$$e_{w1} = 20 \text{ mm}$$

b- Côté largeur de la cuve :

$$l_c = n_2 \cdot 40 + 2e_{w2} \text{ [mm]}$$

- n_2 : Nombre entre axes des ondulations coté largeur.
- N_2 : Nombre d'ondulation coté largeur.

$$N_2 = n_2 + 1$$

$$n_2 = \frac{l_c - 2e_{w2}}{40}$$

Avec $e_{w2} = 20$ mm

$$n_2 = \frac{470 - (2 \times 20)}{40}$$

$$n_2 = 11$$

$$N_2 = 11 + 1$$

$$N_2 = 12$$

Correction de e_{w2} :

$$e_{w2} = \frac{l_c - n_2 \cdot 40}{2} \text{ [mm]}$$

$$e_{w2} = \frac{470 - (11 \times 40)}{2}$$

$$e_{w2}=15\text{mm}$$

Le minimum requis est de 18mm. On prend $e_{w2}=18\text{mm}$.

6-4 : Pertes dissipées par la cuve et le couvercle :

6-4-1 : Pertes dissipées par la cuve:

Les dimensions des ondulations sont choisies à partir du tableau 6-1.

Tableau 6-1

$B_w(\text{mm})$	$t_w(\text{mm})$	50	100	125	160	200	250	280	320
500	$F_W(w)$	34	51	59	69	80	93		
	$G_W(\text{kg})$	0.71	1.2	1.47	1.80	2.26	2.66		
	$V_W(\text{dm}^3)$	0.19	0.39	0.49	0.63	0.79	1.00		
600	$F_W(w)$	40	59	68	79	92	108	116	127
	$G_W(\text{kg})$	0.84	1.43	1.73	2.61	2.64	3.20	3.55	4.02
	$V_W(\text{dm}^3)$	0.23	0.47	0.59	0.76	0.95	1.19	1.34	1.53
700	$F_W(W)$	45	67	76	90	104	122	131	143
	$G_W(\text{kg})$	0.98	1.66	2.01	2.49	3.04	3.72	4.14	4.69
	$V_W(\text{dm}^3)$	0.27	0.55	0.69	0.89	1.11	1.39	2.01	1.78
800	$F_W(W)$	50	74	85	99	115	134	145	159
	$G_W(\text{kg})$	1.11	1.90	2.29	2.84	3.74	4.25	4.72	5.35
	$V_W(\text{dm}^3)$	0.31	0.63	0.79	1.01	1.22	1.59	1.78	2.55
900	$F_W(w)$	55	81	93	109	126	147	159	174
	$G_W(\text{kg})$	1.24	2.13	2.57	3.14	3.87	4.78	5.31	6.01
	$V_W(\text{dm}^3)$	0.35	0.71	0.89	1.14	1.43	1.79	2.01	2.29
1000	$F_W(w)$	60	88	101	118	137	160	172	189
	$G_W(\text{kg})$	1.38	2.36	2.85	3.54	4.32	5.30	5.89	6.68
	$V_W(\text{dm}^3)$	0.39	0.79	0.99	1.27	1.59	1.99	2.23	2.25
1200	$F_W(W)$	70	102	118	137	148	160	187	204
	$G_W(\text{kg})$	1.66	2.85	3.45	4.28	5.23	6.41	7.13	8.08
	$V_W(\text{dm}^3)$	0.47	0.95	1.20	1.55	1.92	2.40	2.69	2.92

La profondeur d'ondulation $t_w = 280\text{mm}$.

La hauteur d'ondulation $B_w = 90\text{ mm}$.

Les pertes dissipées par ondulation $P_{w1} = 159\text{W}$.

Les pertes totales dissipées par toutes les ondulations sont :

- **Côté longueur de la cuve :**

$$P_{w1} = P_{w1} \times 2 \times N_1$$

$$P_{w1} = 159 \times 2 \times 31$$

$$P_{w1} = 9858\text{W}$$

- **Côté largeur de la cuve :**

$$P_{w2} = P_{w1} \times 2 \times N_2$$

$$P_{w2} = 159 \times 2 \times 12$$

$$P_{w2} = 3816\text{W}$$

- **Les pertes totales dissipées par toutes les ondulations :**

$$P_{Wt} = P_{w1} + P_{w2}$$

$$P_{Wt} = 9858 + 3816$$

$$P_{Wt} = 13674\text{W}$$

6-4-2 : Pertes dissipées par le couvercle :

Les pertes dissipées par le couvercle sont données par la formule suivante :

$$P_c = 700 \times S \text{ [W]}$$

➤ S : la surface de dissipation est égale à $:(L+2B_p) \times (l_c+2B_p) \text{ [m}^2\text{]}$.

La valeur de $2B_p$ est en fonction de la gamme de puissance apparente, elle est donnée par le tableau 6-2.

Tableau 6-2

S_n (kVA)	250	350 à 1600
$2B_p$ [m]	0.09	0.13

$$S = (1.240 + 0.13) \times (0.470 + 0.13)$$

$$S = 0.822\text{m}^2$$

$$P_c = 700 \times 0.822$$

$$P_c = 575.4 \text{ W}$$

Les pertes totales dissipées par le couvercle et la cuve sont :

$$P = P_c + P_{Wt} \text{ [W]}$$

$$P = 13674 + 575.4$$

$$P = 14249.4 \text{ W}$$

Les pertes dissipées par la cuve et le couvercle sont supérieures aux pertes à dissiper P_{55} . Ce qui permet un bon fonctionnement et une durée de vie plus longue pour le transformateur.

Conclusion générale



Conclusion générale

Ce mémoire représente le couronnement d'un stage effectué à l'entreprise Electro-Industries dans le cadre de notre projet de fin d'études en vue de l'obtention d'un master professionnel en électrotechnique industrielle.

Notre mémoire est consacré au dimensionnement et procédé de fabrication d'un transformateur de puissance MT/MT de la gamme 30 kV / 5.7 kV qui fonctionnera à une température ambiante de 50 °C.

Cette étude nous a permis de nous imprégner des problèmes rencontrés lors de la construction d'un transformateur de puissance.

A l'issue de notre étude, nous avons pu appréhender l'importance des pertes et des échauffements dans un transformateur. En effet, nous devons tenir compte de ces deux paramètres dans le dimensionnement d'un transformateur puisqu'ils affecteraient le rendement de ce dernier.

Les résultats de notre dimensionnement sont satisfaisants suite aux comparaisons avec le cahier des charges ; les températures et les échauffements trouvés ne dépassent pas les valeurs limites, ce qui confirme le bon choix effectué au niveau des calculs électromagnétiques.

Avant d'effectuer le dimensionnement d'un transformateur spécifique, il est intéressant de s'imprégner du processus de calcul et de fabrication d'un transformateur conventionnel. Cette imprégnation ne peut se faire de manière correcte qu'au niveau d'une firme de fabrication de transformateurs.

Enfin, nous espérons que notre travail servira de support pour toute personne désirent s'informer du processus de dimensionnement et de fabrication des transformateurs de puissance.

Bibliographie

[1] :DJ. BELKACEMI.

« Etude des caractéristiques des matériaux isolants pour transformateurs ».

Mémoire de Magister en électrotechnique. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.

[2] :N. MEZARI.

« Diagnostic des transformateurs de puissance ».

Mémoire de Magister en électrotechnique. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.

[3] : A. Guilbert.

« Circuits magnétiques à flux alternatifs. Transformateurs ». Edition 1973.

[4] : k. HAMMANI et KH.KHOUMERI.

« Calcul et dimensionnement d'un transformateur ».

Ingénieur d'état en électrotechnique. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2000.

[5] : A. YAHIOU.

« Contribution à l'études et à l'analyse du régime transitoire dans les transformateurs de puissance ».

Mémoire de Magister en électrotechnique. Université de Sétif, 2012.

[6] : F. Milsant.

« Machines électriques ».

Edition : Berti. 1993.

[7] :Dj. Medjouti.

« Dimensionnement et réalisation d'un transformateur triphasé hermétique de puissance 400kVA -30kV /400V ».

Mémoire de master en électrotechnique industrielle. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2014.

[8] : M. MEZIANI.

« Contribution à la modélisation analytico- numérique des transformateurs de puissance ».

Magister en électrotechnique. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.