

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUI MAMMERI DE TIZI OUZOU
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE



MEMOIRE

De fin d'études
En vue d'obtention du diplôme
d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Option : Machines Electriques

Thème

Calcul d'un transformateur Leblanc
800 kVA, 10 kV / 2,73 kV

Proposé par :

MR: D. BELKACEMI
ELECTRO-INDUSTRIE
D'AZAZGA

Dirigé par :

MR: D. BOUGUEDAD
MR: D. BELKACEMI

Etudié par :

MR: M.O. AIT HAMOU
MR: H. ADJOUD

Promotion 2008

Remerciements

Nous tenons à présenter nos plus vifs remerciements à notre promoteur Mr DJ. BOUGUEDAD, enseignant à l'université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour sa disponibilité lors de nos différentes sollicitations ainsi que ses précieux conseils pour l'élaboration de ce projet.

Nos remerciements vont également à notre Co-promoteur Mr DJ. BELKACEMI, chef de département technique, unité transformateur à l'ELCRO-INDUSTRIE D'AZAZGA, pour nous avoir proposé ce sujet et les conseils qu'il nous a prodigués tout le long de ce travail. Sans oublier l'ensemble du personnel de l'Electro-Industrie (EX-ENEL).

Nos remerciements vont également aux enseignants qui ont contribué à notre formation, ainsi que les membres du jury qui nous feront l'honneur d'examiner notre travail.

Enfin nos remerciements les plus chaleureux vont également à nos chères familles pour leurs soutiens incessants.



Dédicaces

A la mémoire de mon cousin Hafid,

A mes très chers parents, en témoignage d'affection et de reconnaissance pour leurs sacrifices, leurs encouragements et leurs soutiens,

A mes très chers frères Azouaou, Yougourthene, Amazigh,

A mes très chères sœurs Thinhinane, Klilia,

A ma très chère sœur Sekoura et son époux,

A l'adorable petit Yacine,

A tous mes oncles,

A tous mes cousins et cousines et leurs familles.

A tous ceux qui me sont chers de cœur et de Sang

A tous mes Amis.

Je dédie ce modeste travail.

Ouramdane



Dédicaces

A mes très chers parents, en témoignage d'affection et de reconnaissance pour leurs sacrifices, leurs encouragements et leurs soutiens.

A mon frère Mokrane,

A ma très chère sœur Nadia,

A ma très chère sœur Aldjia et son époux et à l'aimable bébé

ADAM ABDELKRIM,

A mon oncle HAMID et son épouse OURDIA et leurs enfants

NORA, RAMDANE, SAMIR et CELIA,

A toutes mes tantes, en particulier Djedjiga,

A tous mes cousins et cousines,

A tous ceux qui me sont chers de cœur et de Sang,

A tous mes Amis.

Je dédie ce modeste travail.

Hakim

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
-----------------------------------	----------

CHAPITRE I : DEFINITIONS ET GENERALITES SUR LES TRANSFORMATEURS.

I.1. Définition et principe de fonctionnement.....	2
I .1.1. Définition	2
I .1.2. Principe de fonctionnement	2
I.2. Constitution d'un transformateur.....	3
I .2.1. Partie active	3
I.2.2. partie constructive	4
I.3. Paramètres industriels d'un transformateur.....	4
I.3.1. Les paramètres techniques	4
I.3.2. Les paramètres d'exploitations	5
I.4. Dispositifs de protection des transformateurs.....	6
I.4.1. Relais buchholz	6
I.4.2. Thermomètre	6
I.4.3. Les éclateurs	6
I.4.4. Renforcement de l'isolation	6
I.5. Transformateurs de phases.....	6
I.5.1. Transformation triphasé-diphasé par montage Scott	7
I.5.2. Transformation triphasé-diphasé par montage Leblanc	9
I.5.3. Comparaison des montages Scott et Leblanc	10

CHAPITRE II: CALCUL ELECTROMAGNETIQUE

II.1. Calcul des dimensions principales.....	12
II.1.1. Puissance apparente par colonne S_C	12
II.1.2. Tension nominale d'un enroulement.....	12
II.1.3. Courant nominale simple	13
II.1.4. Tension de court-circuit.....	13
II.1.5. Diamètre de la colonne	14
II.1.6. Diamètre du canal de fuite D_{12}	17
II.1.7. Hauteur des enroulements h_B	18
II.2. Calcul des enroulements.....	20
II.2.1. Section du fer de la colonne S_{fer}	20
II.2.2. La tension de spire U_{sp}	20
II.2.3. Nombre de spires.....	21
II.2.4. La Section des conducteurs	23
II.2.5. Choix des conducteurs et du type des enroulements.....	25
II.2.6. Vérification de la tension de court circuit U_{cc}	32
II.2.7. Dimensionnement radial des enroulements.....	34
II.2.8. Hauteur magnétique de bobinage des enroulements h_m	35
II.2.9. Hauteur de montage des bobines des enroulements H_m	35
II.2.10. Dimensionnement de la cale de progression.....	36
II.3. Dimensionnement du circuit magnétique.....	37
II.3.1. Nombre et dimensionnement des gradins	37
II.3.2. Longueur de la fenêtre L_f	38
II.3. 3. Hauteur de la fenêtre H_c	40
II.3. 4. Hauteur du noyau H_n	40

II.3. 5. Longueur entre axes des colonnes E_c	40
II.3. 6. Longueur du noyau L_n	40

CHAPITRE III : CALCUL DES PERTES, DE LA CHUTE DE TENSION ET DU RENDEMENT

III.1. Pertes dans le transformateur.....	41
III.1.1. Pertes dans le fer.....	41
III.1.2. Pertes dans le cuivre	44
III.2. Calcul du courant à vide.....	58
III.2.1. Calcul de la composante active I_{0a}	59
III.2.2. Calcul de la composante réactive I_{0r}	59
III.2.3. Calcul du rapport $\frac{I_0}{I_n}$	60
III.3. Calcul du rendement.....	60
III.3.1. Le rendement maximal.....	62
III.3.2. Rendement pour une charge purement résistive.....	62
III.3.3. Rendement pour une charge purement inductive	63
III.4. Calcul de la chute de tension.....	64
III.4.1. La chute de tension pour une charge purement résistive.....	65
III.4.2. La chute de tension pour une charge inductive.....	66
III.4.3. La chute de tension pour une charge capacitive.....	67

CHAPITRE IV : CALCUL THERMIQUE

IV.1. Echauffement du circuit magnétique.....	72
IV.1.1. Echauffement maximal du circuit magnétique par rapport à la surface dans les deux directions.....	73
IV.1.2. Différence de température entre la surface du circuit magnétique et l'huile dans les deux directions.....	74

IV.1.3. Echauffement maximale du circuit magnétique dans les deux directions.....	75
IV.2. Echauffement moyen des enroulements par rapport à l'huile.....	75
IV.2.1. Echauffement de l'enroulement secondaire par rapport à l'huile..	78
IV.2.2. Echauffement de l'enroulement primaire par rapport à l'huile.....	84
IV.3. Echauffement de l'huile.....	90
IV.3.1. Dimensionnement de la cuve.....	90
IV.3.2. Pertes dissipées par la cuve.....	95
IV.3.3. Calcul de la surélévation maximale de la température d'huile	96
IV.3.4. La surélévation moyenne de la température d'huile	96
IV.3.5. Echauffement de l'huile par rapport à la cuve	96
IV.4. Echauffement de la cuve par rapport à l'air	97
IV.5. Température moyenne du circuit magnétique	98
IV.6 Températures moyennes finales des enroulements	98

CHAPITRE V : CALCUL MECANIQUE

V.1. Calcul du courant maximal de court-circuit.....	99
V.1.1. Pour l'enroulement Haute Tension.....	99
V.1.2. Pour l'enroulement Basse Tension	99
V.2. Calcul des efforts électrodynamiques.....	100
V.2.1. Calcul des efforts radiaux	100
V.2.2. Calcul des efforts axiaux	101
V.2.3. Calcul des efforts unitaires radiaux	102
V.2.4. Calcul des efforts unitaires axiaux	103
V.3. Calcul mécanique des parties constructives.....	104
V.3.1. Calcul du moment maximal supporté par la ferrure de serrage.....	105

V.3.2. Calcul du module de résistance de la ferrure de serrage.....	105
V.3.3. Boulons de serrage	106
V.3.4. Dimensionnement des boulons	107
V.3.5. Tirants de serrage	107
V.4. Calcul du volume de la partie décuvable.....	109
V.5. Calcul du volume de la cuve sans ondulations.....	109
V.6. Calcul du volume des ondulations.....	109
V.7. Calcul du volume total de la cuve.....	109
V.8. Calcul du volume de l'huile dans la cuve.....	110
V.9. Calcul du volume de l'huile total.....	110
V.10. Calcul du poids total du transformateur.....	110
V.10.1. Calcul du poids de la cuve.....	110
V.10.2. Calcul du poids de la partie décuvable	111
V.11. Calcul du poids de l'huile.....	111

CHAPITRE VI : CONSTRUCTION ET ESSAIS

VI.1. Construction.....	112
VI.1.1. Partie active	112
VI.1.2. Partie constructive	114
VI.2. Essais.....	114
VI.2.1. Essais individuels.....	115
VI.2.2. Essais de type.....	116
VI.2.3. Essais spéciaux.....	116

CONCLUSION GENERALE.....	117
---------------------------------	------------

Bibliographie

Annexes

De part l'augmentation de la consommation de l'énergie électrique dans le domaine industriel, les puissances des usines électriques ainsi les puissances des groupes installés, y compris les transformateurs augmentent.

Le transformateur, l'un des dispositifs important, pour l'exploitation de cette énergie électrique, a particulièrement fait l'objet de nombreuses études ayant permis l'exploration des différents paramètres et règles régissant son fonctionnement. C'est ainsi que l'on distingue plusieurs types : les transformateurs de puissance, les transformateurs d'essai, les transformateurs spéciaux, ...etc.

La présente étude s'intéresse au calcul d'un transformateur spécial Leblanc, produisant des tensions diphasées à partir d'une alimentation triphasé ; le calcul est fait à base des spécifications techniques imposées par le cahier des charges.

Il est à noter aussi, ce transformateur est destiné pour l'alimentation des traceurs des pipes (transformateur de soudage à grande intensité).

Cette étude est faite en vue d'une éventuelle réalisation pratique à l'ELCRO-INDUSTRIE d'AZAZGA, elle est répartie en six chapitres :

Chapitre I : Définitions et généralités sur les transformateurs

Chapitre II : Calcul électromagnétique

Chapitre III : Calcul des pertes, du rendement et de la chute de tension

Chapitre IV : Calcul thermique

Chapitre V : Calcul mécanique

Chapitre VI : Construction et essais

Nous terminons notre présent travail par une conclusion générale.

I.1. Définition et principe de fonctionnement :

I.1.1. Définition [1, 2, 3] :

Le transformateur est un appareil statique à induction électromagnétique destiné à transformer un système de tension et de l'intensité du courant délivrés par une source d'énergie électrique alternative en un système de tension et de courant de valeurs différentes mais de même fréquence et de même forme. Il effectue cette transformation avec un excellent rendement.

L'énergie est transférée du primaire au secondaire par l'intermédiaire du circuit magnétique que constitue la carcasse du transformateur. Ces deux circuits sont alors magnétiquement couplés. Ceci permet de réaliser un isolement galvanique entre les deux circuits.

I.1.2. Principe de fonctionnement [1, 2, 3] :

Un transformateur est constitué d'un circuit ferromagnétique fermé portant plusieurs enroulements sans liaison conductrice. Un des enroulements, nommé primaire est alimenté par une source de tension alternative sinusoïdale, un flux magnétique, forcé par cette alimentation s'établit dans la carcasse magnétique. L'autre enroulement appelé secondaire, embrasse ce flux variable et devient le siège d'une f.e.m induite. Celle-ci induira un courant alternatif qui alimentera les récepteurs d'énergie électrique (figure I.1)

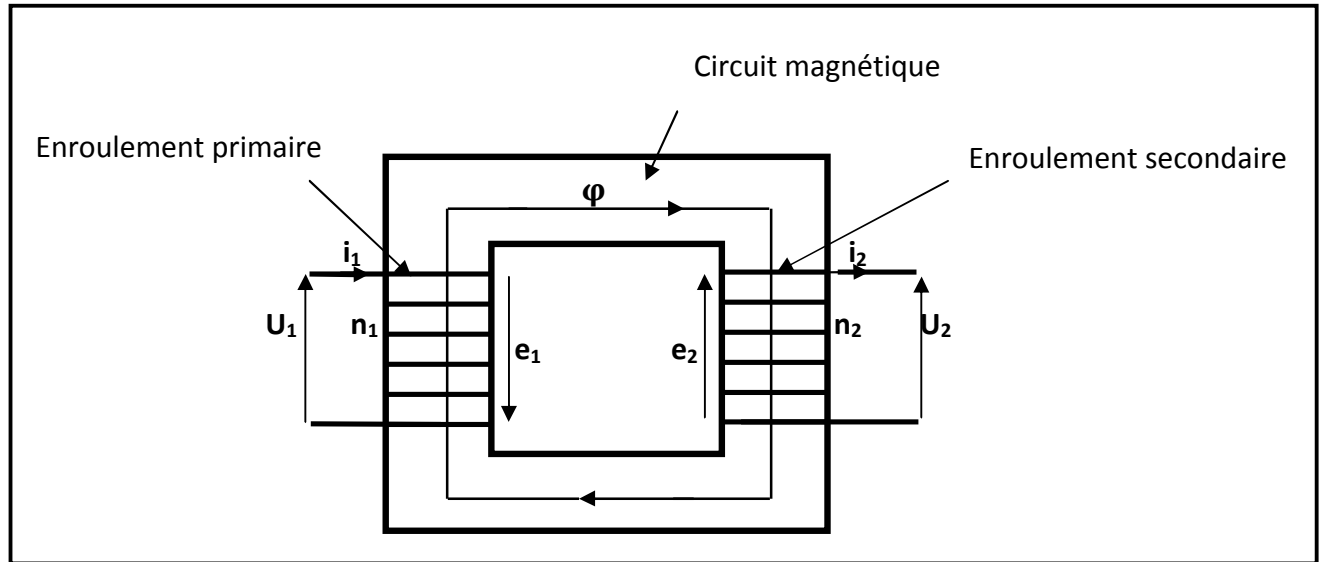


Figure I.1 : Schéma simplifié d'un transformateur monophasé

Le flux principal crée dans les enroulements des forces électromotrices :

$$e_1 = -n_1 \frac{d\phi}{dt} \quad \text{et} \quad e_2 = -n_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{I.1})$$

I.2. Constitution d'un transformateur :

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

I .2.1. Partie active :

Elle est constituée d'un circuit magnétique et de deux enroulements

I .2.1.a. Circuit magnétique [2, 4, 5 , 6 , 7] :

Le circuit magnétique est généralement constitué d'un empilage de tôles permettant d'obtenir une carcasse de la forme désirée. Pour les transformateurs les plus courants, les tôles empilées ont la forme de E et de I, permettant ainsi de glisser une bobine à l'intérieur des fenêtres du circuit magnétique ainsi constitué.

Il existe aussi des transformateurs à circuit magnétique torique (plus performant).

Pour diminuer les pertes, les tôles sont en matériau (alliage Fe + Si) à faible reluctance (diminution des pertes par hystérésis) et isolées entre elles par un vernis (diminution des pertes par courants de Foucault).

Le circuit magnétique comporte des noyaux réunis par des traverses. Sa fonction principale est de canaliser le flux magnétique produit par l'enroulement primaire (figure I.2).

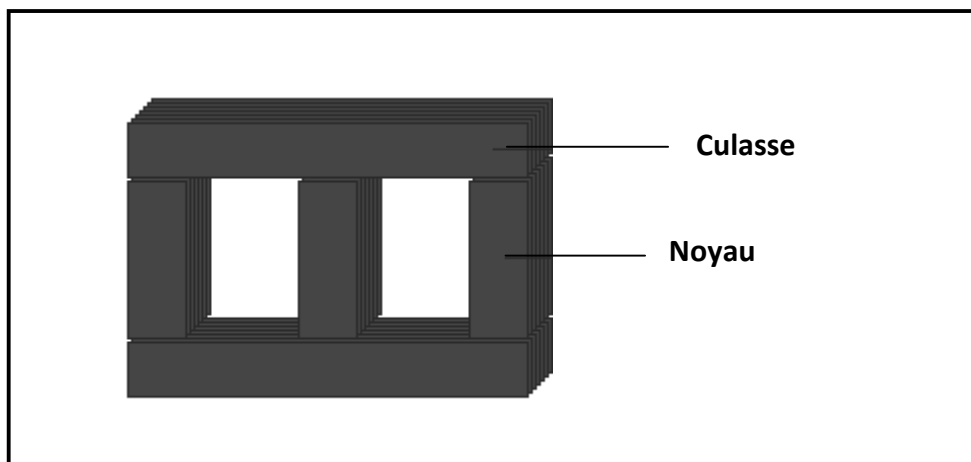


Figure I.2 : Circuit magnétique

I.2.1 .b. Les enroulements [2 , 4 , 7]:

Les deux enroulements sont composés de bobines et répartis chacun sur les deux noyaux, l'enroulement primaire est l'enroulement connecté au générateur de courant alternatif, par contre l'enroulement secondaire est celui qui fournit de l'énergie au réseau.

Les deux enroulements ont en général des nombres de spires différents. Celui qui en possède le moins on le nomme enroulement Basse Tension (BT), l'autre on le nomme

enroulement Haute Tension (HT). Selon les conditions d'emploi et l'installation de l'appareil, l'enroulement haute tension peut être le primaire ou le secondaire.

Les enroulements sont réalisés à partir des conducteurs en cuivre de forme circulaire ou rectangulaire selon la valeur de courant et de la tension.

I.2.2. Partie constructive :

I.2.2.a. La cuve et le couvercle [2 , 3 , 7] :

La cuve est un réservoir à huile pour les transformateurs immergés. Elle est généralement en tôle pliée pour former des ondulations qui favorisent l'échange thermique avec l'extérieur. La profondeur et la période de ces ondulations dépendent de la puissance du transformateur. La cuve joue aussi un rôle d'isolation, en empêchant l'accès aux parties actives du transformateur. Le circuit magnétique est relié à la cuve, qui est elle-même reliée à la terre.

Le couvercle est un élément important de la cuve, il représente la partie supérieure du transformateur, sa fonction est d'assurer la fermeture de la cuve. Par ailleurs, il sert de support aux accessoires tels que les traversées.

I.2.2.b. Les traversées [2 , 3] :

Les enroulements sont reliés aux circuits extérieurs à travers les traversées qui permettent le passage des conducteurs à travers le couvercle. Ce sont des tubes isolants en porcelaine fixés sur le couvercle, leurs formes et leurs dimensions sont très variées.

I.2.2.c. Conservateur d'huile [2 , 3] :

Il est fixé 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 est soudée, sur laquelle l'assécheur d'air est fixé.

I.3. Paramètres industriels d'un transformateur :

I.3.1. Les paramètres techniques :

I.3.1.a. Puissance nominale :

C'est la valeur conventionnelle de la puissance apparente. Elle peut être utilisée lors du fonctionnement du transformateur en régime normal. Elle s'exprime en KVA ou MVA.

I.3.1.b. Tension nominale :

C'est la valeur de la tension pour laquelle seront définies et garanties les caractéristiques à vide du transformateur (courant à vide ; pertes à vides).

I.3.1.c. Courant nominal :

C'est la valeur du courant pour la quelle seront définies et garanties les caractéristiques dues à la charge (pertes dues à la charge, U_{cc}).

I.3. 1.d. Tension de court circuit (U_{cc}) :

C'est la tension réduite qu'il faut appliquer au primaire lorsque le secondaire est en court circuit pour que le courant nominal circule au primaire. Sa valeur est comprise entre 4 et 5 % de la tension nominale.

I.3.1.e. Les pertes à vides :

Lors du fonctionnement à vide, la puissance absorbée par le transformateur est pratiquement dépensée pour compenser les pertes dans le fer, car les pertes à vide sont généralement inférieures ou égales à 2 % de la puissance totale consommée.

- **Les pertes dans le fer :**

Elles résultent de la variation du flux dans le circuit magnétique et se composent des pertes par courants de Foucault et les pertes par hystérésis.

- **Les pertes supplémentaires :**

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

I.3.1.f. Les pertes en court circuit :

Pendant l'essai en court circuit, le flux principal dans le noyau est très petit alors les pertes fer sont négligées et seulement les pertes dans le cuivre seront considérées.

I.3.2. Les paramètres d'exploitations :**I.3. 2.a. Le rendement :**

C'est le rapport de la puissance débitée par le secondaire et la puissance absorbée par le primaire. Le rendement des transformateurs est d'autant meilleur que la puissance apparente est élevée.

I.3.2.b. Chute de tension :

C'est la différence numérique des tensions secondaires à vide et en charge. Elle dépend généralement de la valeur et du type de la charge.

I.4. Dispositifs de protection des transformateurs [2, 7] :

Le transformateur peut être confronté à de nombreux défauts pouvant affecter son fonctionnement et provoquer la détérioration et le vieillissement de son matériel.

Pour remédier à ces défauts, on prévoit des éléments de protection internes et externes.

I.4.1. Relais buchholz :

Le relais est un appareil sensible aux variations de grandeurs issues du réseau ou de l'élément à protéger. Son rôle est la détection des anomalies internes (court circuit, mauvais contact dans les connexions, détérioration de l'isolation....etc.)

Dans le cas d'apparition des conditions anormales, un dispositif se charge de transmettre l'ordre aux organes de signalisation et de commande pour l'ouverture ou la fermeture automatique d'un disjoncteur interposé dans le circuit.

I.4.2. Thermomètre :

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

I.4.3. Les éclateurs :

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

I.4.4. Renforcement de l'isolation :

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

I.5. Transformateurs de phases [4, 5, 6, 8] :

Ce sont des dispositifs qui permettent de réaliser au secondaire des systèmes polyphasés de tensions de même fréquence que les tensions primaires, mais de nombres de phases différents. On s'intéressera ici aux transformateurs produisant des tensions diphasés à partir d'une alimentation triphasé (et réciproquement).

Pour la première transformation de triphasé en diphasé et réciproquement, le principe consiste à choisir sur les enroulements diphasés trois points entre lesquels les tensions soient égales et déphasées de $2\pi/3$. Les montages les plus employés à cet effet sont les montages Scott et Leblanc.

I.5.1. Transformation triphasé-diphasé par montage Scott [1, 4, 5, 6, 8] :

La transformation par montage Scott est réalisée à l'aide de deux transformateurs monophasés T_1 et T_2 (figure I.3). Leurs primaires sont alimentés par les tensions \bar{U}_{AO} et \bar{U}_{BC} produites par un système triphasé équilibré de tensions $\bar{V}_A ; \bar{V}_B ; \bar{V}_C$. Le point o, milieu du primaire de T_2 , a un potentiel situé à mi-chemin entre ceux de B et C (Le primaire de T_2 est un autotransformateur de rapport $\frac{1}{2}$), d'où les tensions primaires, immédiatement appréciables sur le graphique de la figure I.4.

T_1 est dit transformateur hauteur tandis que T_2 est dit transformateur base.

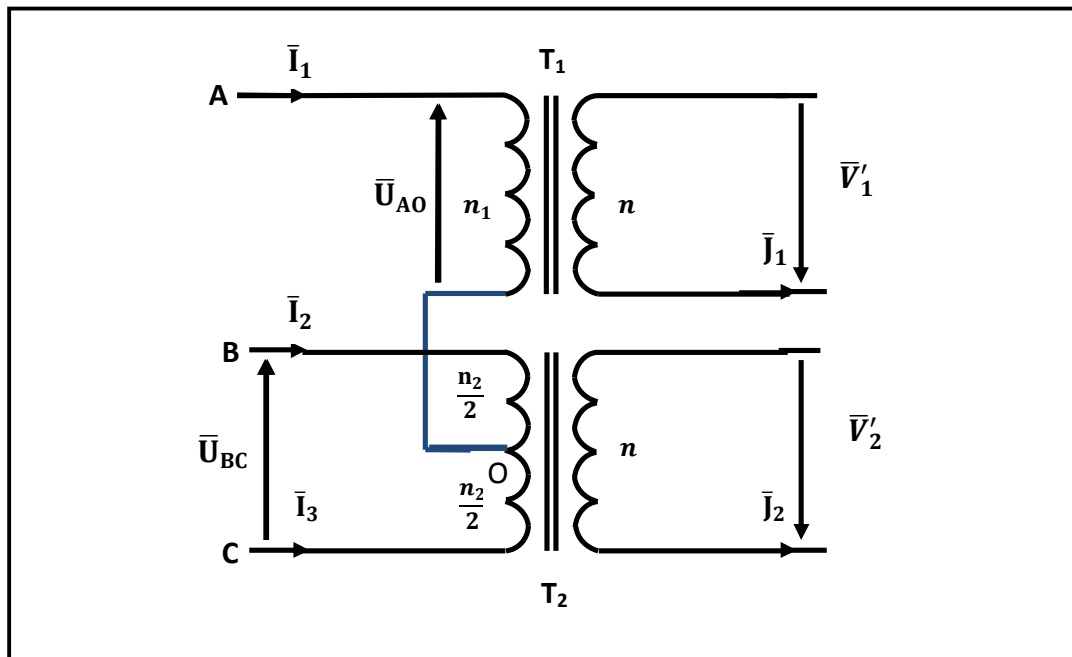
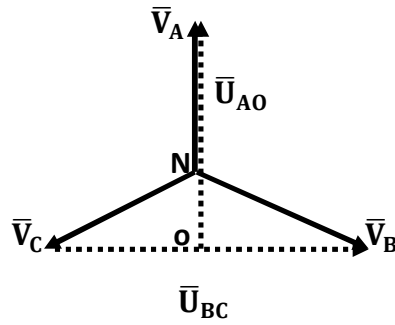


Figure I.3 : Schéma de principe du transformateur Scott

$$\bar{U}_{AO} = \frac{3}{2} \cdot \bar{V}_A \quad (I.2)$$

$$\bar{U}_{BC} = -j\sqrt{3} \cdot \bar{V}_A \quad (I.3)$$

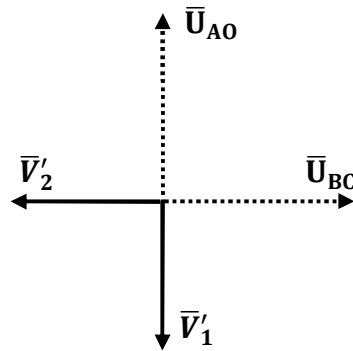
**Figure I.4**

Si on néglige les chutes de tension en charge, les tensions secondaires valent :

$$\bar{V}'_1 = -\frac{n}{n_1} \cdot \bar{U}_{AO} = \frac{3n}{2n_1} \cdot \bar{V}_A \quad (I.4)$$

$$\bar{V}'_2 = -\frac{n}{n_2} \cdot \bar{U}_{BC} \quad \Rightarrow \quad \bar{V}'_2 = -j \frac{\sqrt{3}n}{n_2} \cdot \bar{V}_A \quad (I.5)$$

Les tensions secondaires forment bien un système diphasé (\bar{V}'_2 est en retard de $\frac{\pi}{2}$ sur \bar{V}'_1). (Figure I.5).

**Figure I.5**

Elles forment un système équilibré si leurs valeurs efficaces sont égales, c'est-à-dire si :

$$\frac{3n}{2n_1} \cdot \bar{V}_A = j \frac{\sqrt{3}n}{n_2} \cdot \bar{V}_A \quad (I.6)$$

$$n_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} n_1 \quad (I.7)$$

I.5.2. Transformation triphasé-diphasé par montage Leblanc [4, 5, 6, 8] :

Le montage Leblanc utilise un transformateur triphasé dont les bobines primaires sont identiques couplées en étoile ou en triangle, mais dont les secondaires sont connectés comme l'indique la figure I.6. Cette connexion permet d'équilibrer les courants primaires, c'est-à-dire répartir plus équitablement la charge entre les trois colonnes. On retire x spires au secondaire de la colonne A mais on ajoute x spires sur les colonnes B et C.

Si le primaire est alimenté en triphasé équilibré on aura les tensions secondaires à vide qui valent :

$$\bar{V}'_1 = -\frac{n_1 - x}{n} \cdot \bar{V}_A + \frac{x}{n} \cdot \bar{V}_B + \frac{x}{n} \cdot \bar{V}_C$$

$$\bar{V}'_1 = -\frac{n_1}{n} \cdot \bar{V}_A + \frac{x}{n} (\bar{V}_A + \bar{V}_B + \bar{V}_C) \quad \Rightarrow \quad \bar{V}'_1 = -\frac{n_1}{n} \cdot \bar{V}_A \quad (\text{I.8})$$

$$\bar{V}'_2 = -\frac{n_2}{n} \cdot \bar{V}_B + \frac{n_2}{n} \cdot \bar{V}_C = \frac{n_2}{n} \bar{U}_{BC} \quad \Rightarrow \quad \bar{V}'_2 = j \frac{n_2 \cdot \sqrt{3}}{n} \cdot \bar{V}_A \quad (\text{I.9})$$

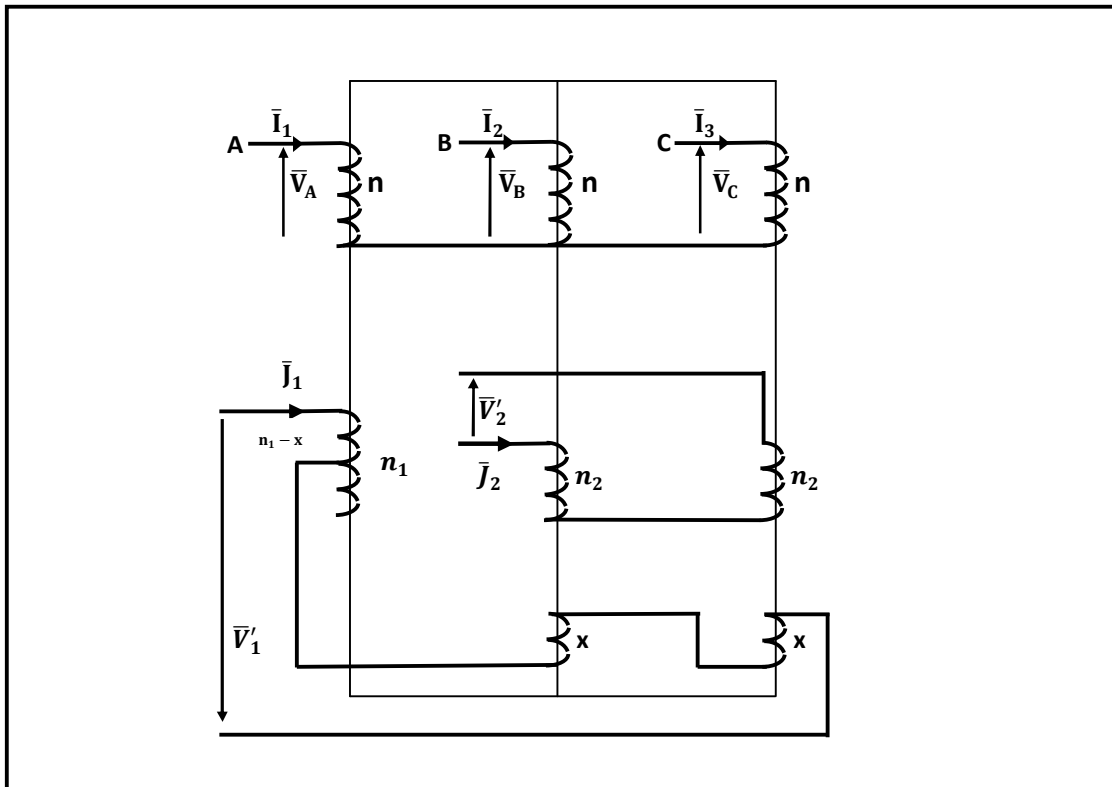


Figure I.6 : Schéma de principe du transformateur Leblanc

Les tensions secondaires constituent un système diphasé (\bar{V}'_2 est en quadrature retard sur \bar{V}'_1)

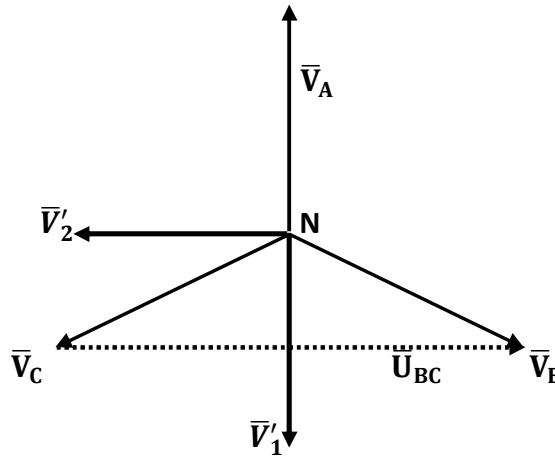


Figure I.7

Les tensions secondaires ont même valeur efficace si :

$$\frac{n_1}{n} \cdot \bar{V}_A = \frac{n_2 \cdot \sqrt{3}}{n} \cdot \bar{V}_A$$

$$n_1 = \sqrt{3} \cdot n_2 \quad (\text{I. 10})$$

Le nouveau montage étudié permet d'appeler des courants triphasés équilibrés au primaire lorsque le secondaire débite sur une charge diphasée symétrique. Ce dernier montage a les mêmes propriétés que le montage Scott étudié au paragraphe précédent.

I.5.3. Comparaison des montages Scott et Leblanc [4, 5, 6]:

Les deux montages ne fonctionnent bien qu'en régime équilibré. Le montage Leblanc offre, par rapport au Scott, l'avantage de ne pas provoquer de déséquilibre triphasé quand le diphasé est équilibré. Il fonctionne correctement dans les deux sens. Le montage Leblanc utilise une culasse magnétique triphasée, donc d'utiliser moins de fer et nécessite plus de cuivre.

Le montage Scott présente un inconvénient, celui d'utiliser deux circuits magnétiques indépendants, ce qui induit à des mutuelles parasites entre les deux circuits. D'où un encombrement important.

Toutefois lorsque le diphasé est à tension élevée, il serait imprudent de mettre les deux phases l'une à côté de l'autre sur la même colonne. Dans ce cas c'est au transformateur Scott qu'il faut avoir recours car il ne porte sur chaque circuit magnétique qu'un primaire et qu'un secondaire pouvant être séparés l'un de l'autre par l'épaisseur désirable d'isolant.

Au contraire, si c'est le triphasé qui est à tension élevée, le transformateur Leblanc avec trois enroulement externes à haute tension est préférable du point de vue de l'isolement.

Le calcul électromagnétique d'un transformateur nécessite en premier lieu un calcul préliminaire, permettant de déterminer à partir du cahier des charges les dimensions principales en ce referent aux tableaux standards de l'ELECTRO-INDUSTRIE et aux normes internationales, ensuite on procédera à un calcul définitif de toutes les caractéristiques géométriques et électromagnétiques, enfin comparer les deux résultats.

II.1. Calcul des dimensions principales [3, 9, 10] :

Les dimensions principales d'un transformateur sont :

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

Ces dimensions sont illustrées en figure II.1

II.1.1. Puissance apparente par colonne S_c :

$$S_c = \frac{S_n}{m} [\text{kVA}] \quad (\text{II. 1})$$

S_c : Puissance apparente nominale du transformateur

m : Nombre de colonnes

$$S_c = \frac{800}{3} = 267 \text{ kVA}$$

$$S_c = 267 \text{ kVA}$$

II.1.2. Tension nominale d'un enroulement :

La tension de phase dépend du mode du couplage de l'enroulement.

II.1.2.a. Enroulement primaire (HT) :

L'enroulement primaire est connecté en triangle, la tension de phase est donnée par :

$$U_{ph1} = 10 \text{ kV} \quad (\text{II. 2})$$

II.1.2.b. Enroulement secondaire (BT) :

Le secondaire est constitué de deux enroulements monophasés, la tension nominale d'un enroulement est donnée par :

$$V_{ph1} = V_{ph2} = 2730 \text{ V} \quad (\text{II. 3})$$

II.1.3. Courant nominale simple :

Le courant nominal simple dépend du mode de couplage, de la puissance nominale et de la tension nominale simple.

II.1.3.a. Courant nominal simple primaire :

$$I_{ph1} = \frac{I_n}{\sqrt{3}} = \frac{S_c}{U_{ph1}} \quad (II. 4)$$

$$I_{ph1} = \frac{267}{10} = 26.7 \text{ A}$$

$$I_{ph1} = 26,7 \text{ A}$$

II.1.3.b. Courant nominal simple secondaire :

$$J_{ph1} = J_{ph2} = \frac{S_c}{U_{ph2}} \quad (II. 5)$$

$$J_{ph1} = \frac{267 \times 10^3}{2730}$$

$$J_{ph1} = J_{ph2} = 97,8 \text{ A}$$

II.1.4. Tension de court-circuit :

C'est la tension qu'il faut appliquer au primaire d'un transformateur, son secondaire étant court-circuité. Elle s'exprime en [%] de la tension nominale. La tension de court-circuit a deux composantes :

- Une composante active U_{cca} .
- Une composante réactive U_{ccr} .

Cette tension est donnée par :

$$U_{cc} = \sqrt{U_{cca}^2 + U_{ccr}^2} \quad (II. 6)$$

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

Avec :

$$U_{cca} = \frac{P_{cc}}{S_n} \times 100 \quad (II. 7)$$

P_{cc} : Pertes en court- circuit

$$U_{cca} = \frac{7}{800} \times 100$$

$$U_{cca} = 0,875 [\%]$$

$$U_{\text{ccr}} = \sqrt{6^2 - 0,875^2}$$

$$U_{\text{ccr}} = 5,93 \text{ [\%]}$$

II.1.5. Diamètre de la colonne :

Le diamètre de la colonne est donné par la relation suivante :

$$D = \sqrt[4]{\frac{16 \cdot \mu_0 \cdot a_r \cdot \beta \cdot K_R \cdot S_c}{\pi^3 \cdot f \cdot K_u^2 \cdot B_c^2 \cdot U_{\text{ccr}}}} \text{ [mm]} \quad (\text{II. 8})$$

- S_c : Puissance apparente par colonne.
- U_{ccr} : Composante réactive de la tension de court-circuit.
- a_r : Epaisseur rapportée du canal de fuite.
- β : Coefficient de Svelteuse.
- K_R : Coefficient de Rogowski.
- K_u : Facteur d'utilisation de la section du fer.
- B_c : Induction magnétique de crête.
- μ_0 : Perméabilité magnétique du vide. $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$
- f : Fréquence industrielle imposée par le réseau. $f = 50 \text{ Hz}$

La démonstration se trouve en annexe 1

II.1.5.a. Epaisseur rapporté du canal de fuite a_r :

Pour les enroulements concentriques a_r est donnée la formule suivante :

$$a_r = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \text{ [mm]} \quad (\text{II. 9})$$

- a_{12} : Largeur du canal de fuite (entre les deux enroulements). Pour un transformateur émergé dans l'huile, a_{12} est donné par le tableau II.1.

U_n [kV]	3	6	10	15	20	35	110	220
U_{CEI} [kV]	3.6	7.2	12	17.5	24	36	123	245
a_{12} [cm]	0.66	1	0.8+1.2	1+1.5	1.2+1.8	2.1+2.7	6+8	13+22

Tableau II.1

Pour un calcul préliminaire, on prend $a_{12} = 10 \text{ mm}$

- a_1 : Epaisseur de l'enroulement haute tension.
- a_2 : Epaisseur de l'enroulement basse tension.

Le terme $\frac{a_1 + a_2}{3}$ est fonction de la puissance apparente par colonne ; il est donné par la formule suivante :

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = K \cdot \sqrt[4]{S_c} [\text{mm}] \quad (\text{II. 10})$$

K : Facteur dépendant de la puissance apparente par colonne et de la tension la plus grande du transformateur. La valeur de K est donnée par le tableau II.2.

$S_c [\text{KVA}]$	≤ 100	100÷560	750÷ 5600	7500÷ 31500
$U_1 [\text{KV}]$	≤ 10	10	35	—
K	0.6÷0.8	0.48÷0.6	0.4÷0.5	0.44÷0.46

Tableau II.2

Pour un calcul préliminaire, on prend $K=0,6$

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = 0,6 \times \sqrt[4]{267}$$

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = 24,2 \text{ mm}$$

$$a_r = 10 + 24,2$$

$$a_r = 34,2 \text{ mm}$$

II.1.5.b. Coefficient de Svelteesse :

Le coefficient de Svelteesse est donné par la formule suivante :

$$\beta = \frac{\pi \cdot D_{12}}{h_B} \quad (\text{II. 11})$$

- D_{12} : Diamètre du canal de fuite.
- h_B : Hauteur de la bobine.

La valeur de β est fonction de la puissance par colonne, de la tension la plus grande et du type de matériau utilisé pour le bobinage. La valeur de β est donnée par le tableau II.3

$S_c [\text{KVA}]$	3÷2000		2000÷3000	
$U_n [\text{KV}]$	6÷10	35	110	
β Aluminium	1.15÷1.8		1.49÷1.77	
β Cuivre	1.75÷3.4	1.8÷3	1.3÷1.8	1.5 ÷2

Tableau II.3

Pour un calcul préliminaire, on prend $\beta = 1,8$

II.1.5.c. Coefficient de Rogowski K_R :

C'est le coefficient de réduction de la hauteur de l'enroulement à la longueur théorique des lignes de champs de dispersion. K_R est donnée par la formule suivante :

$$K_R = 1 - \frac{a_1 + a_2 + 2 \cdot a_{12}}{2 \cdot \pi \cdot h_B} \quad (\text{II. 12})$$

Pour un enroulement concentrique, sa valeur est comprise entre (0,9 et 0,97), pour un calcul préliminaire, on prend $K_R = 0,97$

II.1.5.d. Facteur d'utilisation de la section du fer K_u :

K_u est donné par la relation suivante :

$$K_u = K_g \cdot K_r \quad (\text{II. 13})$$

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

S_c [kVA]	≤ 5	5÷15	15÷45	45÷500
N Gradins	2	4	5	6
D approché [cm]	≤ 8	8÷12	12÷16	16÷51
K_g	0.786	0.866	0.91	0.93

Tableau II.4

Pour notre calcul, on prend $K_g = 0,93$ et le nombre de gradins $N_g = 6$ gradins.

- K_r : Coefficient de remplissage qui tient compte de l'isolation et de l'épaisseur des tôles utilisées. Sa valeur varie de 0,93 à 0,98

Pour un calcul préliminaire, on prend $K_r = 0,96$

$$K_u = 0,93 \times 0,96$$

$$K_u = 0,893$$

II.1.5.e. Induction de crête B_c :

L'induction de crête B_c tient compte de la puissance du transformateur et du type des tôles utilisées. Sa valeur est donnée par le tableau II.5.

S_c [kVA]	10+15	75+250	315+600	630+1000	≥ 1000
B [T] laminée à froid	1.35+1.55	1.55+1.65	1.62+1.68	1.63+1.69	1.64+1.7
B [T] laminée à chaud	1.1+1.35	1.41+1.46	1.42+1.47	—	1.43+1.48

Tableau II.5.

Pour un calcul préliminaire, on prend $B_c = 1,68$ T

II.1.5.f. Calcul définitif du diamètre de la colonne D :

$$D = \sqrt[4]{\frac{16 \times 4 \times 3,14 \times 10^{-7} \times 34,2 \times 10^{-3} \times 1,8 \times 0,97 \times 267 \times 10^3}{3,14^3 \times 50 \times 0,893^2 \times 1,68^2 \times 5,93 \times 10^{-2}}}$$

$$D = 198,4 \text{ mm}$$

II.1.6. Diamètre du canal de fuite D_{12} :

D_{12} est donné par la relation suivante :

$$D_{12} = D + 2 \cdot a_{20} + 2 \cdot a_2 + a_{12} [\text{mm}] \quad (\text{II. 14})$$

- a_{20} : Désigne la distance entre la colonne et l'enroulement basse tension, sa valeur est donnée en fonction de la tension secondaire du transformateur et est donnée par le tableau II.6.

U_{n2} [kV]	≤ 1	3	6	10	15	20	35
a_{20} [cm]	0.5	1.2	1.2+1.5	1.8	1.8+2	2.1+2.5	3

Tableau II.6.

Pour un calcul préliminaire, on prend $a_{20} = 12$ mm

- a_2 : Epaisseur de l'enroulement basse tension, sa valeur est donnée par la formule suivante :

$$a_2 = K_{a2} \cdot \sqrt[4]{S_c} [\text{mm}] \quad (\text{II. 15})$$

➤ K_{a2} : Coefficient dépendant de la tension nominale, on le définit comme suite :

$$K_{a2} = \begin{cases} 0,55 & \text{pour } U_n \leq 35 \text{ [kV]} \\ 0,45 & \text{pour } U_n \leq 110 \text{ [kV]} \end{cases}$$

Dans notre cas, on prend $K_{a2} = 0,55$

$$a_2 = 0,55 \times \sqrt[4]{267}$$

$$\mathbf{a_2 = 22,2 \text{ mm}}$$

D'où :

$$D_{12} = 198,4 + 2 \times 12 + 2 \times 22,2 + 10$$

$$\mathbf{D_{12} = 276,8 \text{ mm}}$$

II.1.7. Hauteur des enroulements h_B :

On définit h_B comme suite :

$$h_B = \frac{\pi \cdot D_{12}}{\beta} [\text{mm}] \quad (\text{II. 16})$$

$$h_B = \frac{3,14 \times 276,8}{1,8}$$

$$\mathbf{h_B = 482,8 \text{ mm}}$$

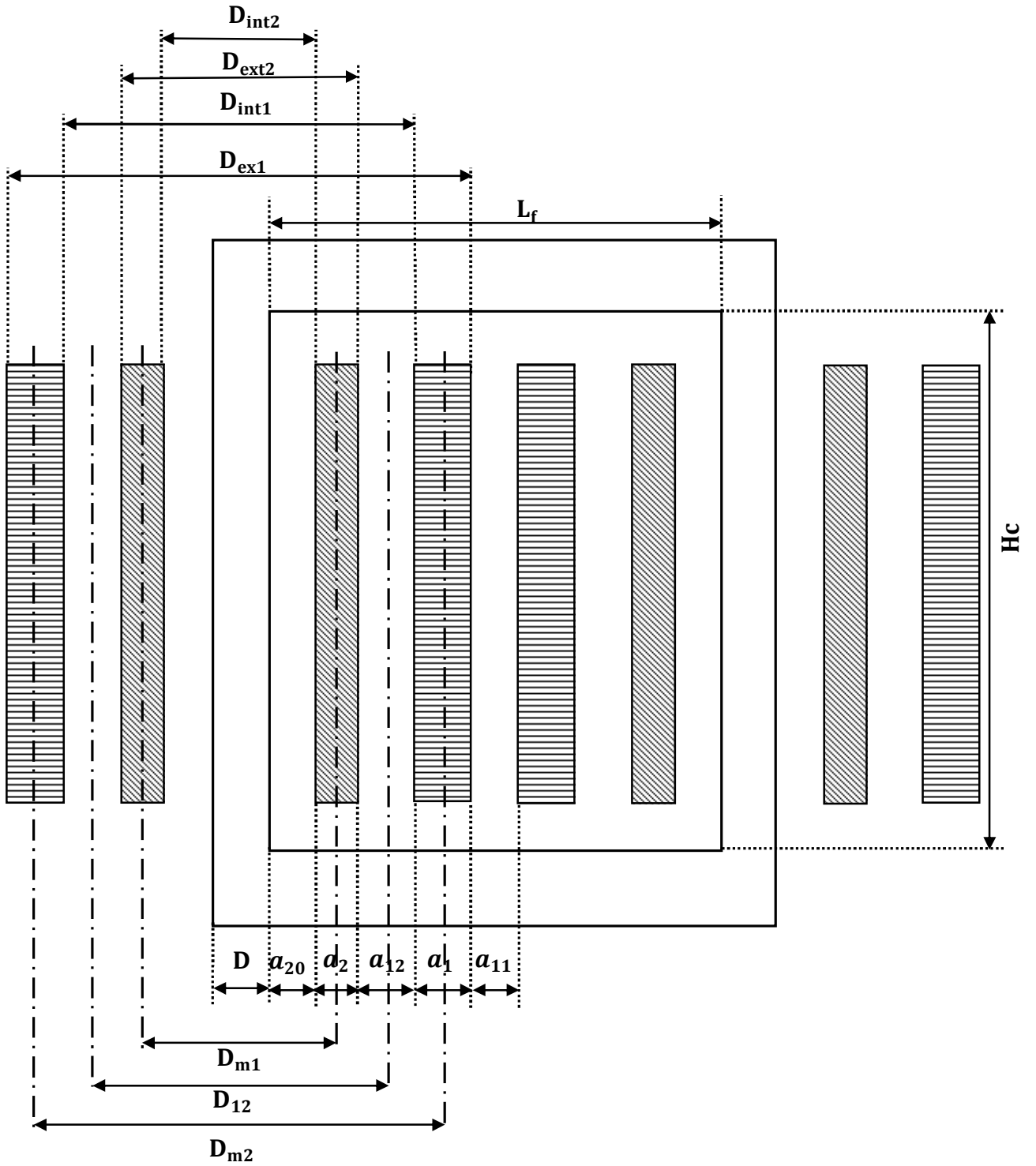


Figure II.1. Schéma représentatif d'une colonne avec les enroulements.

II.2. Calcul des enroulements :

Dans ce type de transformateur on aura à calculer l'enroulement primaire avec le nombre de spires identique sur les trois colonnes, mais pour les enroulements des deux phases du secondaire on aura à calculer le nombre de spires de manière à avoir leurs nombres sur chaque colonne.

La détermination complète d'un enroulement se fait en calculant les grandeurs suivantes :

- Le nombre de spires.
- La section des conducteurs.
- Choix des conducteurs et du type des enroulements.

Le nombre de spires dépend de la tension de spire. Cette dernière est fonction de la section du fer de la colonne et de l'induction B_c .

II.2.1. Section du fer de la colonne S_{fer} :

$$S_{fer} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot K_u \text{ [mm}^2\text{]} \quad (\text{II. 17})$$

$$S_{fer} = \frac{3,14 \times 198,4^2}{4} \times 0,893$$

$$S_{fer} = 276 \times 10^2 \text{ mm}^2$$

II.2.2. La tension de spire U_{sp} :

Du fait que les deux enroulements HT et BT sont embrassés par le même flux magnétique principal canalisé par le circuit magnétique, la tension de spire primaire et secondaire sera la même.

Elle est donnée par la formule suivante :

$$U_{sp} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot B_c \cdot S_{fer} \text{ [V/spire]} \quad (\text{II. 18})$$

$$U_{sp} = \sqrt{2} \times 3,14 \times 50 \times 1,68 \times 276 \times 10^{-4}$$

$$U_{sp} = 10,3 \text{ V/spire}$$

II.2.3. Nombre de spires [4, 5, 6, 9]:

II.2.3.a. Enroulement Haute Tension :

$$n = \frac{U_{ph1}}{U_{sp}} \quad (II.19)$$

$$n = \frac{10000}{10,3}$$

$$n = 971 \text{ spires}$$

II.2.3.b. Enroulements Basse Tension :

Ici on calculera le nombre de spires en supposant que l'enroulement de la première phase du secondaire se trouve sur la première colonne (Figure II.2). Ensuite on calculera le nombre de spires pour la connexion réelle, qui tient compte de la répartition équitable de la charge sur les trois colonnes pour les deux enroulements du secondaire (Figure II.3).

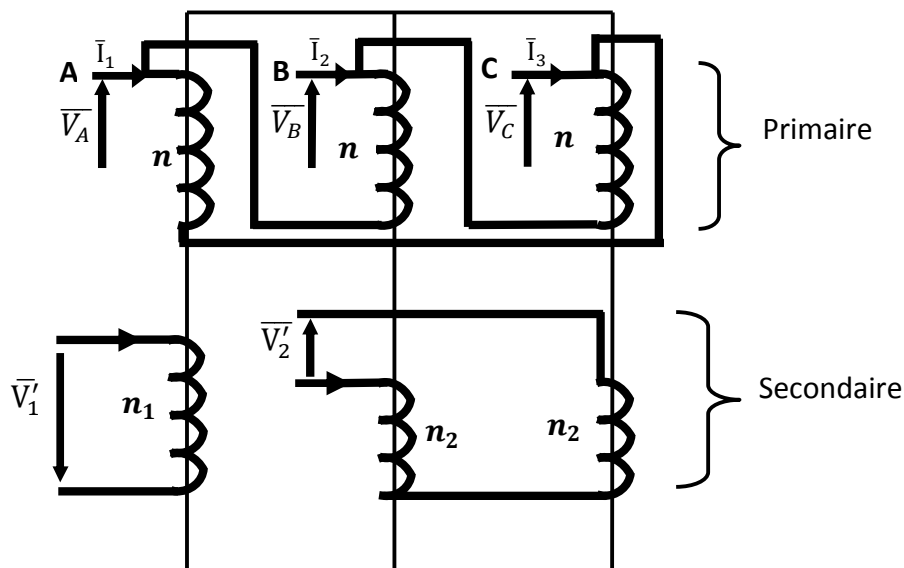


Figure II.2

D'après l'équation (I.8) on a :

$$n_1 = \frac{V_{ph1}}{U_{ph1}} \cdot n = \frac{2730}{10000} \times 971$$

$$n_1 = 265 \text{ spires}$$

- D'après l'équation (I. 10) on aura :

$$n_2 = \frac{n_1}{\sqrt{3}} = \frac{265}{\sqrt{3}}$$

$$n_2 = 153 \text{ spires}$$

- Calcul de la valeur de x :

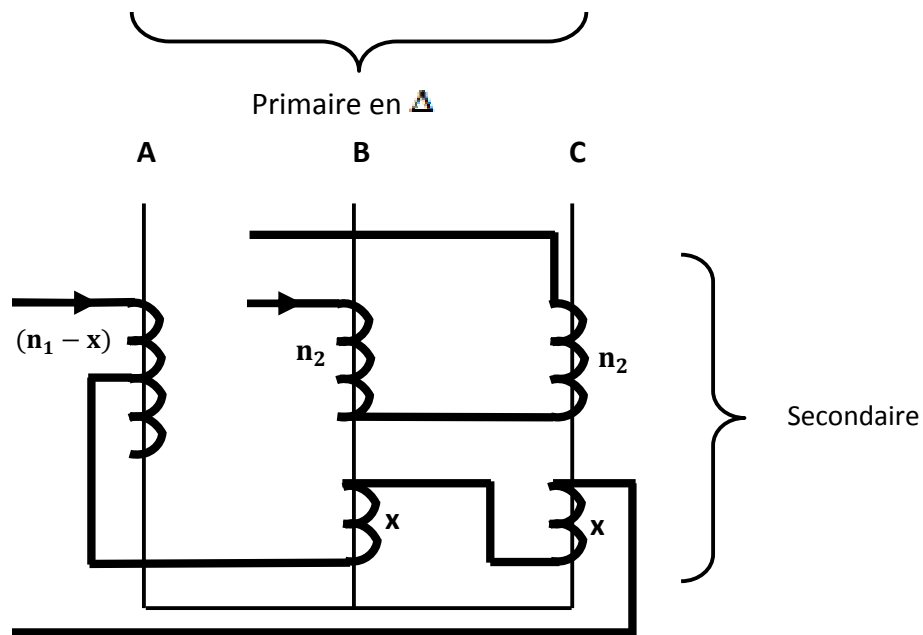


Figure II.3

Les ampères- tours sur chaque colonne est :

Colonne A : $n \cdot I_1 = -(n_1 - x) \cdot j_1$
 $= -n_1 \cdot j_1 + x \cdot j_1 \dots\dots\dots (1)$

Colonne B : $n \cdot I_2 = -n_2 \cdot j_2 + x \cdot j_1 \dots\dots\dots (2)$

Colonne C : $n \cdot I_3 = n_2 \cdot j_2 + x \cdot j_1 \dots\dots\dots (3)$

$$(1) + (2) + (3) \Rightarrow n(I_1 + I_2 + I_3) = (-n_1 + 3x)j_1$$

Or: $I_1 + I_2 + I_3 = 0$

$$\Rightarrow -n_1 + 3x = 0$$

$$x = \frac{n_1}{3} \quad (\text{II. 20})$$

$$x = \frac{265}{3}$$

$$x = 88 \text{ Spires}$$

$$(n_1 - x) = 265 - 88$$

$$(n_1 - x) = 177 \text{ Spires}$$

II.2.3.c. Recalcul de la tension de spire :

$$U_{sp} = \frac{U_{ph2}}{n_1} = \frac{2730}{265}$$

$$U_{sp} = 10.3 \text{ V/spire}$$

II.2.3.d. Recalcul de l'induction de crête B_c :

$$B_{cr} = \frac{U_{sp}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot S_{fer}} = \frac{10.3}{\sqrt{2} \times 3,14 \times 50 \times 276 \times 10^{-4}}$$

$$B_{cr} = 1,68 \text{ T}$$

II.2.4. Section des conducteurs :

La section du conducteur est donnée par la formule suivante :

$$S_w = \frac{I}{J_m} [\text{mm}^2] \quad (\text{II. 21})$$

- J_m : Densité du courant [A/mm^2]

II.2.4.a. Calcul de la densité du courant J_m :

$$J_m = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \rho_T \cdot K_{pcc}} \cdot \frac{P_{cc}}{S_n} \cdot \frac{U_{sp}}{D_{12}} [\text{A}/\text{mm}^2] \quad (\text{II. 22})$$

- K_{pcc} : Facteur tenant compte des pertes supplémentaires en court-circuit ; sa valeur est donnée en fonction de la puissance apparente du transformateur et est donnée par le tableau II.7.

S_n [kVA]	30	180	600	1000	1600	2000	2500	4000
K_{pcc}	1.020	1.025	1.05	1.06	1.07	1.075	1.08	1.09

Tableau II.7

Pour notre calcul, on prend $K_{pcc} = 1,06$

- ρ_T est donnée par :

$$\rho_T = \rho_{20}[1 + \alpha(T - 20)] \quad [\Omega \cdot m]$$

- ρ_{20} : Résistivité du cuivre à 20°C, $\rho_{20} = 0,0178 \times 10^{-6} \Omega m$
- α : Coefficient de température, $\alpha = 3,81 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
- T : Température de fonctionnement, $T = 75^\circ\text{C}$

$$\rho_{75^\circ} = 0,0178 \times 10^{-6} \times [1 + 3,81 \times 10^{-3} \times (75 - 20)]$$

$$\rho_{75^\circ} = 0,0215 \times 10^{-6} \Omega m$$

Donc :

$$J_m = \frac{1}{2 \times 3,14 \times 0,0215 \times 1,06} \times \frac{7}{800} \times \frac{10.3}{276.8 \times 10^{-3}}$$

$$J_m = 2,27 \text{ A/mm}^2$$

II.2.4.b. Calcul de la section des conducteurs Basse Tension :

$$S_2 = \frac{J_{ph1}}{J_m} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (\text{II. 23})$$

$$S_2 = \frac{97,8}{2,27}$$

$$S_2 = 43,08 \text{ mm}^2$$

II.2.4.c. Calcul de la section des conducteurs Haute Tension :

$$S_1 = \frac{I_{ph1}}{J_m} [\text{mm}^2] \quad (\text{II. 24})$$

$$S_1 = \frac{26,7}{2,27}$$

$$S_1 = 11.76 \text{ mm}^2$$

II.2.5. Choix des conducteurs et du type des enroulements :**II.2.5.a. L'enroulement Basse Tension :**

Pour l'enroulement Basse Tension on utilisera des conducteurs méplats ; leurs dimensions sont données par le Tableau II.8. Pour un conducteur ayant une section $S_2 = 43,08 [\text{mm}^2]$, les dimensions sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Section normalisée la plus proche } S_{2\text{nor}} = 43,8 \text{ mm}^2 \\ \text{Épaisseur du conducteur } a = 3,55 \text{ mm} \\ \text{Largeur du conducteur } b = 12,5 \text{ mm} \\ \text{l'épaisseur de l'isolation } e_{\text{iso}} = 0,5 \text{ mm} \end{array} \right.$$

Tableau II.8: Section et dimensions des conducteurs méplats (a, b) non isolés.

Au dessous du trait fort : prévoir une isolation de 0,5 [mm].

Au dessus du trait prévoir une isolation de 0,45 [mm].

(La section est exprimée en [mm²] a et b en [mm])

a : épaisseur du conducteur - b : largeur du conducteur

a/b	4.5	5.0	5.6	6.3	7.1	8.0	9.0	10.0	11.2	11.8	12.5	13.2	14.0	15.0	16.0
1.0			5.4	6.1	6.9										
1.12			6.1	6.8	7.7										
1.25	5.4	6.0	6.8	7.7	8.7										
1.4	6.1	6.8	7.6	8.6	9.7	11.0									
1.6	7.0	7.8	8.7	9.9	11.2	12.6									
1.8	7.7	8.6	9.7	11.0	12.4	14.0	15.8								
2.0	8.6	9.6	10.8	12.2	13.8	15.6	17.6								
2.24	9.7	10.8	12.2	13.8	15.5	17.6	19.8	22.0							
2.5		12.0	13.5	15.2	17.2	19.4	22.0	24.4							
2.8		13.4	15.1	17.1	19.3	21.8	24.6	27.4	30.8						
3.15		15.2	17.1	19.3	21.8	24.6	27.8	31.0	34.7	36.6	38.8				
3.55			19.3	21.8	24.7	27.8	31.4	35.0	39.2	41.3	43.8	46.3	49.2		
4.0				24.3	25.7	31.1	35.1	39.1	43.9	46.3	49.1	51.9	55.1	59.1	63.1
4.5					31.1	35.1	39.6	44.1	49.5	52.2	55.4	58.5	62.1	66.6	71.1
5.0					34.6	39.1	44.1	49.1	55.1	58.1	61.6	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	55.4	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	87.4	92.4	98.1	105.0	112.0
8.0									88.3	93.1	98.7	104.0	111.0	119.0	127.0
8.5											105.0		118.0		135.0

II.2.5.b. Correction de la densité du courant :

$$J_{mc2} = \frac{J_{ph1}}{S_{2nor}} = \frac{97,8}{43,8}$$

$$J_{mc2} = 2,23 \text{ A/mm}^2$$

- L'erreur commise sur la densité du courant :

$$\frac{\Delta J_m}{J_m} = \frac{|J_m - J_{mc2}|}{J_m} \times 100 = \frac{|2,27 - 2,23|}{2,27} \times 100$$

$$\frac{\Delta J_m}{J_m} = 1.76\%$$

- L'erreur commise sur la densité de courant est inférieure à la valeur admissible qui est de 4,5%

II.2.5.c. Calcul du nombre de couches pour chaque groupe de spires:

- ❖ Le nombre de spires par couche :

$$N_{2s/c} = \frac{h_B}{b'} \quad (\text{II. 25})$$

- b' : Largeur du conducteur à Basse Tension.

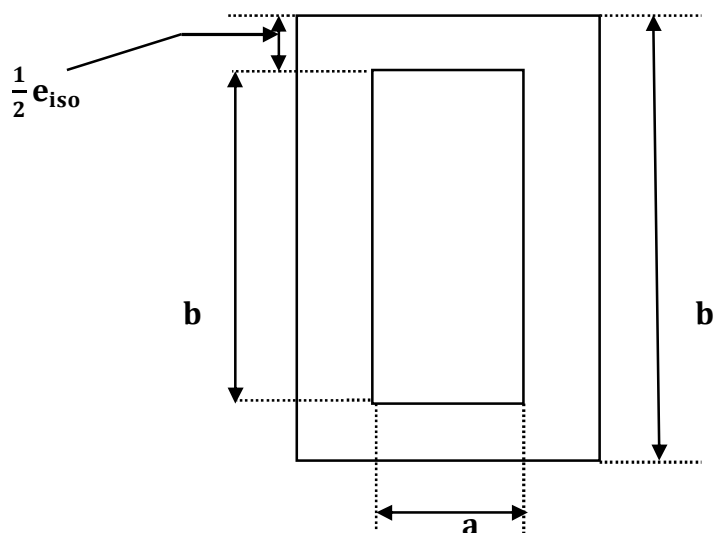


Figure II.4. Disposition à plat des conducteurs Basse Tension

$$b' = b + e_{\text{iso}} = 12.5 + 0,5$$

$$b' = 13 \text{ mm}$$

$$N_{2s/c} = \frac{482,8}{13}$$

$$N_{2s/c} = 37 \text{ spires/couches}$$

❖ Le nombre de couches pour chaque groupe de spires (Figure II.3)

➤ Le nombre de couches pour le groupe $(n_1 - x)$ spires:

$$N_{2c1} = \frac{(n_1 - x)}{N_{2s/c} - 1} = \frac{177}{36}$$

$$N_{2c1} = 5 \text{ Couches}$$

➤ Le nombre de couches pour le groupe x spires :

$$N_{2c2} = \frac{x}{N_{2s/c} - 1} = \frac{88}{36}$$

$$N_{2c2} = 2 \text{ Couches}$$

➤ Le nombre de couches pour le groupe n_2 :

$$N_{2c3} = \frac{n_2}{N_{2s/c} - 1} = \frac{153}{36}$$

$$N_{2c3} = 4 \text{ Couches}$$

II.2.5.d. Epaisseur de l'enroulement Basse Tension :

❖ Pour la colonne A :

$$a_{2A} = N_{2c1} \cdot a' + 2 \cdot C + 2 \cdot e_{\text{psp}} \text{ mm} \quad (\text{II. 26})$$

▪ a' : Epaisseur du conducteur méplat avec isolation :

$$a' = a + e_{\text{iso}} = 3,55 + 0,5$$

$$a' = 4.05 \text{ mm}$$

- C : Epaisseur d'isolation entre les couches ; on prend $C = 6 \text{ mm}$
- e_{psp} : Epaisseur d'isolation entre les couches ; sa valeur varie de 0,5 à 1 mm
- On prend $e_{\text{psp}} = 0,8 \text{ mm}$

$$a_{2A} = 5 \times 4,05 + 2 \times 6 + 2 \times 0,8$$

$$a_{2A} = 33,8 \text{ mm}$$

❖ Pour les colonnes B et C :

$$a_{2B} = a_{2C} = [N_{2C3} \cdot a' + 2 \cdot e_{\text{psp}} + C_2] + C'_2 + [N_{2C2} \cdot a' + e_{\text{psp}}] \text{ [mm]}$$

- C'_2 : Epaisseur d'isolation entre les deux groupes de spires n_2 et x.
- On prend $C'_2 = 6 \text{ mm}$
- On prend $e_{\text{psp}} = 0,5 \text{ mm}$

$$a_{2B} = a_{2C} = (4 \times 4.05 + 2 \times 0.5 + 2) + 6 + (2 \times 4.05 + 0.5)$$

$$a_{2B} = a_{2C} = 33.8 \text{ mm}$$

II.2.5.e. Hauteur de l'enroulement Basse Tension :

$$h_{B2} = b' \cdot (N_{2S/c} + 1) \text{ [mm]} \quad (\text{II. 27})$$

$$h_{B2} = 13 \times (37 + 1)$$

$$h_{B2} = 494 \text{ mm}$$

II.2.5.f. L'enroulement Haute Tension :

Pour l'enroulement Haute Tension de section $S_1 = 11.76 \text{ mm}^2$, on utilisera une disposition en galettes.

Pour cela, on prendra deux conducteurs élémentaires en fil rond en cuivre isolé avec du papier de section :

$$S'_1 = \frac{S_1}{2} = \frac{11.76}{2}$$

$$S'_1 = 5,88 \text{ mm}^2$$

Les sections et dimensions du fil rond sont indiquées par le tableau II.9

Section du fil [mm ²]	Diamètre nu [mm]	Diamètre isolé [mm]	Section du fil [mm ²]	Diamètre nu [mm]	Diamètre isolé [mm]
2.01	1.6	1.86	3.94	2.24	2.50
2.27	1.7	1.96	4.37	2.36	2.62
2.54	1.8	2.06	4.91	2.5	2.76
2.84	1.9	2.16	5.52	2.65	2.91
3.14	2.0	2.26	6.16	2.8	3.06
3.53	2.12	2.38	7.07	3.0	3.26

Tableau II.9

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Section normalisée la plus proche } S'_{1\text{nor}} = 6,16 \text{ mm}^2 \\ \text{Diamètre nu du fil } d'_{\text{nu}} = 2,8 \text{ mm} \\ \text{Diamètre isolé du fil } d'_{\text{iso}} = 3,06 \text{ mm} \\ \text{Épaisseur de l'isolation } e'_{\text{iso}} = 0,26 \text{ mm} \end{array} \right.$$

II.2.5.g. Correction de la densité du courant :

$$J_{\text{mc1}} = \frac{I_{\text{ph1}}}{2 \cdot S'_{1\text{nor}}} = \frac{26,7}{2 \times 6,16}$$

$$J_{\text{mc1}} = 2,17 \text{ A/mm}^2$$

- L'erreur commise sur la densité du courant :

$$\frac{\Delta J_m}{J_m} = \frac{|J_m - J_{\text{mc1}}|}{J_m} \times 100 = \frac{|2,27 - 2,17|}{2,27} \times 100$$

$$\frac{\Delta J_m}{J_m} = 4,40 \% < 4,5\%$$

II.2.5.h. Calcul de la hauteur de chaque galette H_g :

L'enroulement Haute Tension est composé de deux groupes en parallèle. Chaque groupe contient quatre bobines partielles qui sont montées en série et séparées par des canaux radiaux de refroidissement. (Figure II.5)

Pour déterminer la hauteur de chaque galette, on prendra l'un des groupes en parallèle et on calculera cette hauteur comme suite :

$$H_g = \frac{\frac{H_m}{2} - 3C - E_{\text{cp}} - E_p}{4} \text{ [mm]} \quad (\text{II. 28})$$

- H_m : Hauteur de montage Haute Tension

La hauteur de montage est la même pour les enroulements Haute et Basse Tension ; elle est définie comme suit :

$$H_m = h_{B2} + 2 \cdot d \text{ [mm]} \quad (\text{II. 29})$$

- d : Bande marginale, on prend $d = 30 \text{ mm}$

$$H_m = 494 + 2 \times 30$$

$$H_m = 554 \text{ mm}$$

- C : Distance entre galettes, on prend $C = 6 \text{ mm}$
- E_{cp} : Epaisseur de la cale de progression, on prend $E_{cp} = 25 \text{ mm}$
- E_p : Epaisseur du papier, on prend $E_p = 2 \text{ mm}$

$$H_g = \frac{\frac{554}{2} - 3 \times 6 - 25 - 2}{4}$$

$$H_g = 58 \text{ mm}$$

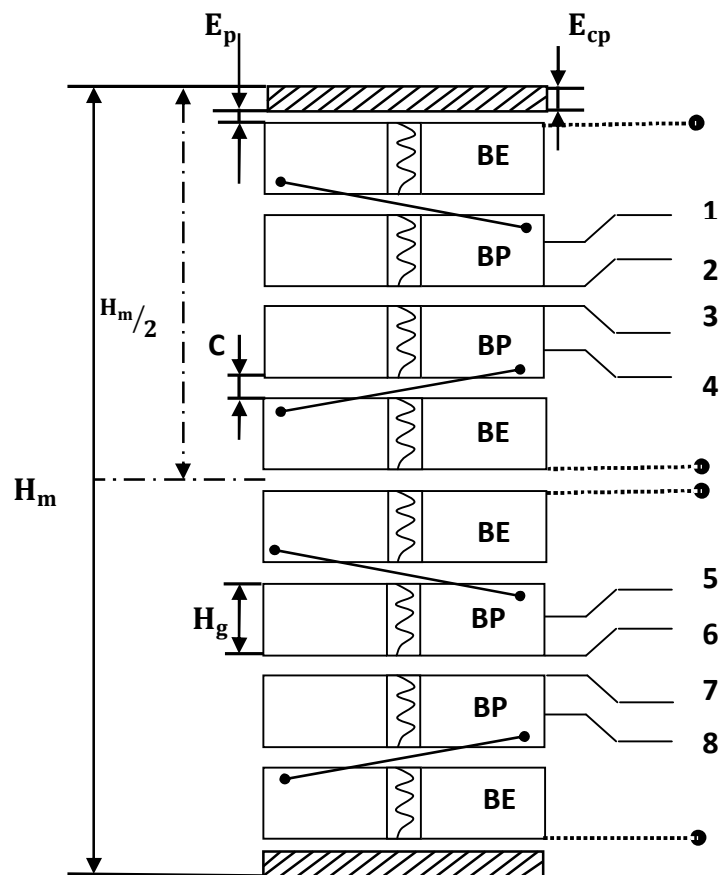


Figure II.5. Disposition à galettes des conducteurs à Haute Tension

II.2.5.i. Nombre de spires dans chaque galette $N_{s/g}$:

Les spires de l'enroulement Haute Tension sont réparties en chaque bobine partielle, donc on calculera le nombre de spires comme suit :

$$N_{s/g} = \frac{n}{4} = \frac{971}{4}$$

$$N_{s/g} = 243 \text{ spires}$$

II.2.5.j. Nombre de spires par couche dans chaque galette $N_{s/c}$:

$$N_{s/c} = \frac{H_g}{d'_{iso}} = \frac{58}{3,06}$$

$$N_{s/c} = 19 \text{ spires/couche}$$

II.2.5.k. Nombre de couches dans chaque galette N_{c1} :

$$N_{c1} = \frac{N_{s/g}}{N_{s/c}} = \frac{243}{19}$$

$$N_{c1} = 13 \text{ couches}$$

II.2.5.l. Epaisseur de l'enroulement Haute Tension :

$$a_1 = (d'_{iso} \cdot N_{c1}) \cdot 0,9 \text{ [mm]} \quad (\text{II. 30})$$

- 0,9 : Coefficient de correction pour la disposition des conducteurs Haute Tension

$$a_1 = (3,06 \times 13) \times 0,9$$

$$a_1 = 35.8 \text{ mm}$$

II.2.5.m. Recalcul du diamètre du canal de fuite D_{12} :

$$D_{12} = D + 2 \cdot a_{20} + 2 \cdot a_2 + a_{12} \text{ [mm]}$$

$$D_{12} = 198,4 + 2 \times 12 + 2 \times 33.8 + 10$$

$$D_{12} = 300 \text{ mm}$$

II.2.6. Vérification de la tension de court circuit U_{cc} :

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

Pour vérifier la tension de court circuit, on recalculera d'abord la tension de court circuit réactive U_{ccr} qui est défini comme suite :

$$U_{ccr} \% = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot n^2 \cdot a_r \cdot K_R \cdot I_{ph1} \cdot \beta}{U_1} \times 100 \quad (\text{II. 31})$$

- Recalcul de l'épaisseur rapportée du canal de fuite a_r :

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

$$a_r = 10 + \frac{35.8 + 33.8}{3} [\text{mm}]$$

$$\mathbf{a_r = 33.2 \text{ mm}}$$

- Recalcul du coefficient de Rogowski K_R :

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

$$K_R = 1 - \frac{35,8 + 33,8 + 2 \times 10}{2 \times 3,14 \times 494}$$

$$\mathbf{K_R = 0,97}$$

- Recalcul du coefficient de Sveltesse β :

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

$$\beta = \frac{3,14 \times 300}{494}$$

$$\mathbf{\beta = 1,9}$$

- L'erreur commise sur le coefficient de Sveltesse :

$$\frac{\Delta\beta}{\beta} = \frac{|\beta - \beta_c|}{\beta} \times 100 = \frac{|1,8 - 1,9|}{1,8} \times 100$$

$$\frac{\Delta\beta}{\beta} = \mathbf{5,55 \%}$$

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

$$U_{ccr}\% = \frac{2 \times 3,14 \times 50 \times 4 \times 3,14 \times 10^{-7} \times 971^2 \times 3.32 \times 10^{-2} \times 0,97 \times 26,7 \times 1,9}{10^4} \times 100$$

$$\mathbf{U_{ccr}\% = 6.07\%}$$

$$U_{cc} = \sqrt{0,875^2 + 6.07^2}$$

$$U_{cc} = 6,13 \%$$

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

$$\frac{\Delta U_{cc}}{U_{cc}} = \frac{|U_{cc} - U_{ccr}|}{U_{cc}} \times 100 = \frac{|6 - 6,13|}{6} \times 100$$

$$\frac{\Delta U_{cc}}{U_{cc}} = 2,16 \%$$

- L'erreur commise sur la tension de court circuit est définie comme suit :

$$\frac{\Delta U_{cc}}{U_{cc}} = +10\%. \text{ Donc elle est admissible}$$

II.2.7. Dimensionnement radial des enroulements (Figure II.6) :

II.2.7.a. Diamètre intérieur de l'enroulement Basse Tension D_{i2} :

$$D_{i2} = D + 2 \cdot a_{20} \text{ [mm]} \quad (\text{II. 32})$$

$$D_{i2} = 198,4 + 2 \times 12$$

$$D_{i2} = 222,4 \text{ mm}$$

II.2.7.b. Diamètre extérieur de l'enroulement Basse Tension D_{ex2} :

$$D_{ex2} = D_{in2} + 2 \cdot a_2 \text{ [mm]} \quad (\text{II. 33})$$

$$D_{ex2} = 222,4 + 2 \times 33,8$$

$$D_{ex2} = 290 \text{ mm}$$

II.2.7.c. Diamètre intérieur de l'enroulement Haute Tension D_{in1} :

$$D_{in1} = D_{ex2} + 2 \cdot a_{12} \text{ [mm]} \quad (\text{II. 34})$$

$$D_{in1} = 290 + 2 \times 10$$

$$D_{in1} = 310 \text{ mm}$$

II.2.7.d. Diamètre extérieur de l'enroulement Haute Tension D_{ex1} :

$$D_{ex1} = D_{in1} + 2 \cdot a_1 \text{ [mm]} \quad (\text{II. 35})$$

$$D_{ex1} = 310 + 2 \times 35,8$$

$$D_{ex1} = 381,6 \text{ mm}$$

II.2.8. Hauteur magnétique de bobinage des enroulements h_m :

La hauteur magnétique de bobinage sera déterminée en tenant compte de sa différence avec la hauteur de bobinage h_B . A l'ENEL on admet une différence de 0 à 16 mm.

$$h_m = h_{B2} - b' \text{ [mm]}$$

$$h_m = 494 - 13$$

$$\mathbf{h_m = 481 \text{ mm}}$$

II.2.9. Hauteur de montage des bobines des enroulements H_m (Figure II.6) :

La hauteur de montage est la même pour les enroulements Haute et Basse tension, elle a été calculée précédemment

$$\mathbf{H_m = 554 \text{ mm}}$$

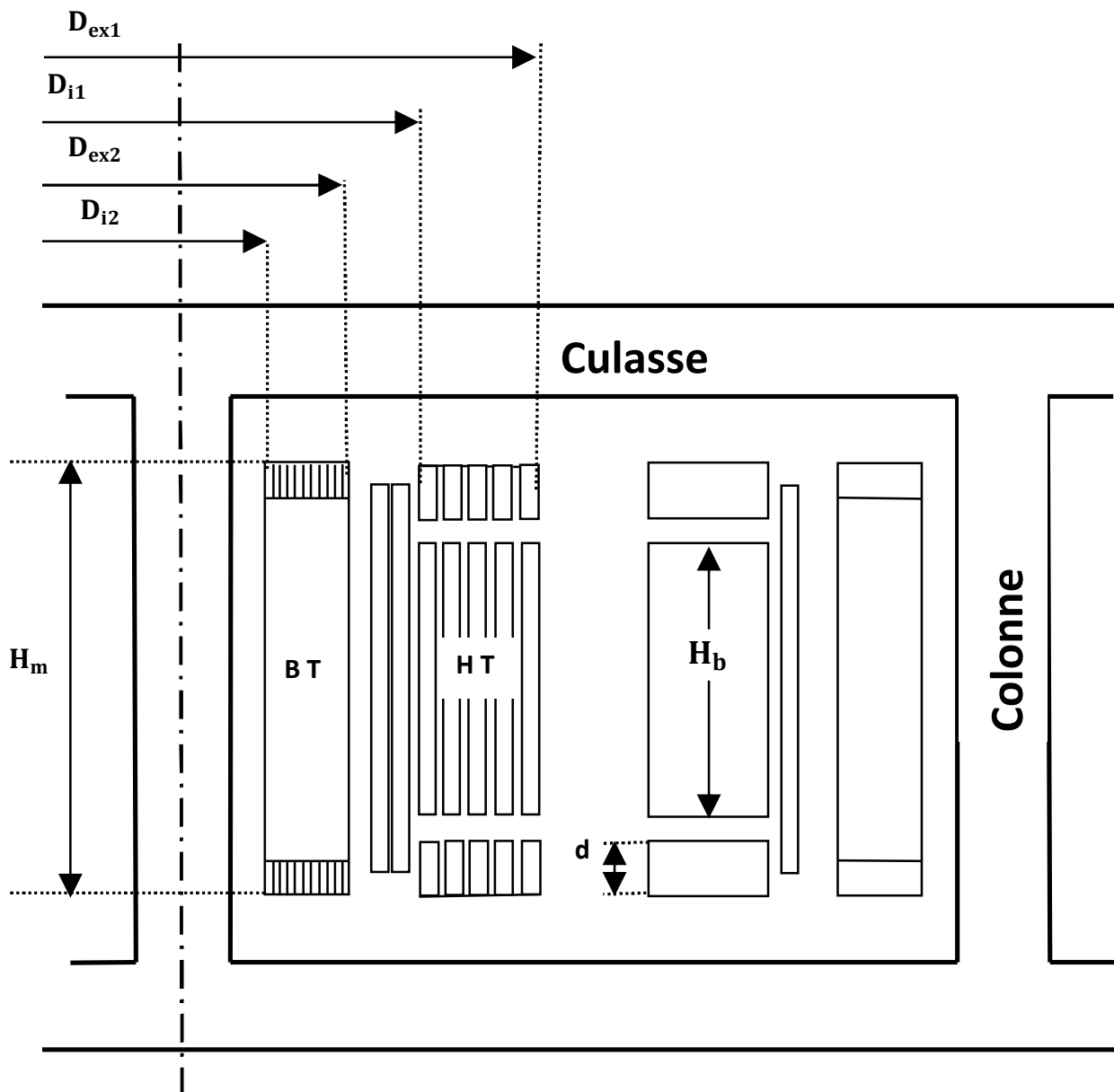


Figure II.6. Disposition et dimensions des bobines

II.2.10. Dimensionnement de la cale de progression (Figure II.7) :

On utilise une cale de progression pour des conducteurs méplats, elle est disposée de chaque extrémité des bobines des enroulements. Cette cale est en papier dur.

$$b_1 = \frac{H_m - h_{B2}}{2} \text{ [mm]}$$

$$b_1 = \frac{554 - 494}{2}$$

$$b_1 = 30 \text{ mm}$$

$$b_2 = b_1 + b' [\text{mm}]$$

$$b_2 = 30 + 13$$

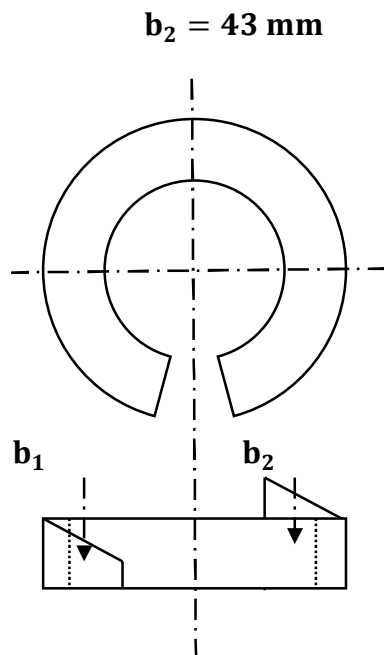


Figure II.7. Cale de progression

II.3. Dimensionnement du circuit magnétique :(Figure II.8)

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

II.3.1. Nombre et dimensionnement des gradins:

Le nombre de gradins est choisi d'après le (tableau II.4). Pour le diamètre de la colonne $D = 198,4 \text{ mm}$, on prendra $N_g = 6$ gradins.

- Les normes donnent pour les longueurs des gradins les valeurs suivantes :

$$B_{s1} = 0,960.D$$

$$B_{s1} = 190 \text{ mm}$$

$$B_{s2} = 0,885.D$$

$$B_{s2} = 175 \text{ mm}$$

$$B_{s3} = 0,775.D$$

$$B_{s3} = 154 \text{ mm}$$

$$B_{s4} = 0,631.D$$

$$B_{s4} = 125 \text{ mm}$$

$$B_{s5} = 0,460.D$$

$$B_{s5} = 91 \text{ mm}$$

$$B_{s6} = 0,280.D$$

$$B_{s6} = 55 \text{ mm}$$

- Pour déterminer les hauteurs des gradins, on applique le théorème de Pythagore.

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

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

$$H_{s1} = 57 \text{ mm}$$

$$H_{s2} = \sqrt{D^2 - B_{s2}^2}$$

$$H_{s2} = 93 \text{ mm}$$

$$H_{s3} = \sqrt{D^2 - B_{s3}^2}$$

$$H_{s3} = 125 \text{ mm}$$

$$H_{s4} = \sqrt{D^2 - B_{s4}^2}$$

$$H_{s4} = 154 \text{ mm}$$

$$H_{s5} = \sqrt{D^2 - B_{s5}^2}$$

$$H_{s5} = 176 \text{ mm}$$

$$H_{s6} = \sqrt{D^2 - B_{s6}^2}$$

$$H_{s6} = 190 \text{ mm}$$

II.3.2. Longueur de la fenêtre L_f :

$$L_f = D_{ex1} - B_{s1} + a_{11} \text{ [mm]} \quad (\text{II. 36})$$

- a_{11} : Distance latérale entre deux enroulements haute tension voisins ; sa valeur est donnée par le (tableau II.10).

U_n [kV]	a_{11} [cm]	L_{02} [cm]
5	1	2÷3
10	1.4	3÷5
20	1.7	5
30	2.3	6÷7.5

Tableau II.10

Pour notre cas, on prend $a_{11} = 14 \text{ mm}$.

$$L_f = 381,4 - 190 + 14$$

$$\mathbf{L_f = 205,4 \text{ mm}}$$

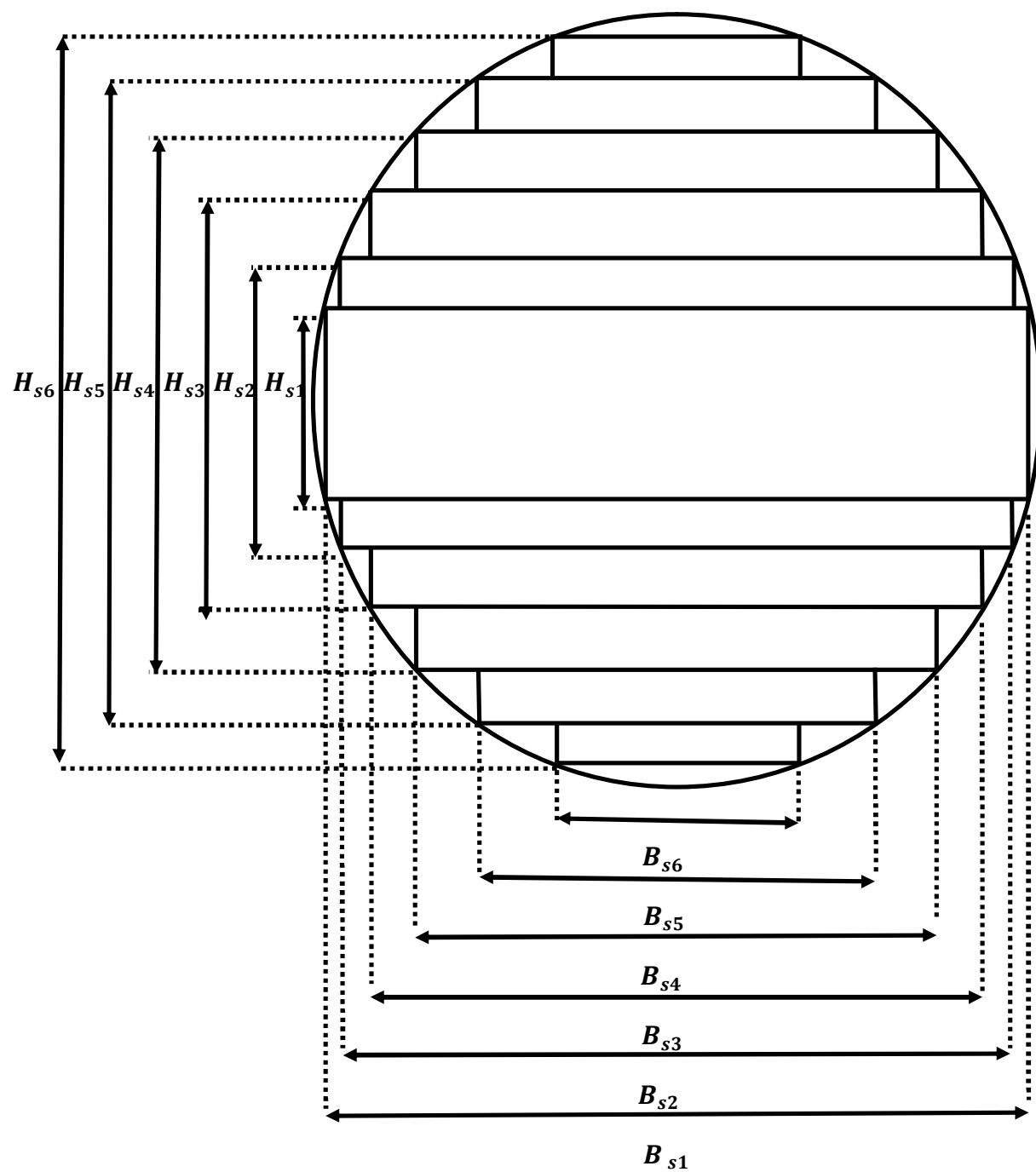


Figure II.8. Représentation des gradins

II.3. 3. Hauteur de la fenêtre H_c :

$$H_c = h_{B2} + 2 \cdot L_{20} \text{ [mm]} \quad (\text{II. 37})$$

- L_{20} : Dépend de la tension nominale, sa valeur est donnée par le (tableau II.10)

Pour notre cas, on prend $L_{20} = 50 \text{ mm}$

$$H_c = 494 + 2 \times 50$$

$$\mathbf{H_c = 594 \text{ mm}}$$

II.3. 4. Hauteur du noyau H_n :

$$H_n = H_c + 2 \cdot B_{s1} \text{ [mm]} \quad (\text{II. 38})$$

$$H_n = 594 + 2 \times 190$$

$$\mathbf{H_n = 974 \text{ mm}}$$

II.3. 5. Longueur entre axes des colonnes E_c :

$$E_c = L_f + B_{s1} \text{ [mm]} \quad (\text{II. 39})$$

$$E_c = 205,4 + 190$$

$$\mathbf{E_c = 395,4 \text{ mm}}$$

II.3. 6. Longueur du noyau L_n :

$$L_n = 2 \cdot E_c + B_{s1} \text{ [mm]} \quad (\text{II. 40})$$

$$L_n = 2 \times 395,4 + 190$$

$$\mathbf{L_n = 980,8 \text{ mm}}$$

Comme toute machine électrique, un transformateur est formé de fer et de cuivre. Puisqu'il est statique, c'est-à-dire ne comporte aucun organe tournant, il est le siège de pertes dans le fer et de pertes dans le cuivre [5].

III.1. Pertes dans le transformateur :

- Pertes dans le fer :

Les pertes fer ou les pertes à vide sont localisées dans les tôles du circuit magnétique, elles sont essentiellement les pertes par hystérésis et les pertes par courants de Foucault, leur valeur 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.

III.1.1. Pertes dans le fer [1, 3, 4, 9, 10] :

III.1.1.a. Poids du noyau :

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

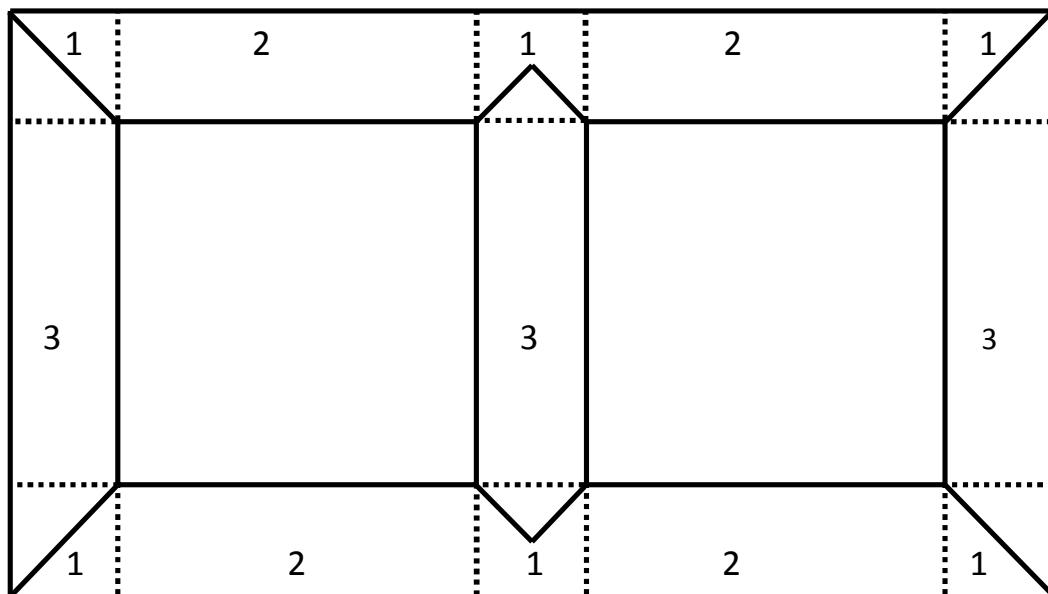


Figure III.1. Les éléments du noyau

$$G_n = G_1 + G_2 + G_3 \text{ [kg]} \quad (\text{III. 1})$$

▪ **Poids total des coins G_1 :**

$$G_1 = \gamma_{\text{fer}} \cdot N_1 \cdot B_{s1} \cdot S_{\text{fer}} \text{ [kg]} \quad (\text{III. 2})$$

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

- N_1 : Nombre de coins, $N_1 = 6$
- V_1 : Volume total des coins

$$V_1 = 6 \cdot (B_{s1} \cdot S_{\text{fer}}) = 6 \times (190 \times 276 \times 10^2)$$

$$V_1 = 3,14 \times 10^7 \text{ mm}^3$$

- γ_{fer} : Masse volumique des tôles utilisées. $\gamma_{\text{fer}} = 7,65 \text{ kg/dm}^3$

$$G_1 = 7,65 \times 3,14 \times 10$$

$$G_1 = 240,2 \text{ kg}$$

▪ **Poids des culasses G_2 :**

$$G_2 = \gamma_{\text{fer}} \cdot N_2 \cdot 2 \cdot L_f \cdot S_{\text{fer}} \text{ [kg]} \quad (\text{III. 3})$$

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

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

$$V_2 = 4 \cdot (L_f \cdot S_{\text{fer}}) = 4 \times (205,4 \times 276 \times 10^2)$$

$$V_2 = 2,26 \times 10^7 \text{ mm}^3$$

$$G_2 = 7,65 \times 2,26 \times 10$$

$$G_2 = 172,9 \text{ kg}$$

▪ **Poids des colonnes G_3 :**

$$G_3 = \gamma_{\text{fer}} \cdot N_3 \cdot H_c \cdot S_{\text{fer}} \text{ [kg]} \quad (\text{III. 4})$$

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

$$V_3 = 3 \cdot (H_c \cdot S_{\text{fer}}) = 3 \times (594 \times 276 \times 10^2)$$

$$V_3 = 4,91 \times 10^7 \text{ mm}^3$$

$$G_3 = 7,65 \times 4,91 \times 10$$

$$G_3 = 375,6 \text{ kg}$$

$$G_n = 240,2 + 172,9 + 375,6$$

$$G_n = 788,7 \text{ kg}$$

III.1.1.b. Pertes dans le noyau P'_0 :

$$P'_0 = \gamma_{1.5} \cdot K_{Bp} \cdot G_n \text{ [W]} \quad (\text{III. 5})$$

- $\gamma_{1.5}$: Pertes spécifiques pour une induction donnée.

Pour une induction de 1,5 T, on a $\gamma_{1.5} = 0,97 \text{ W/kg}$.

Si l'induction est différente de 1,5 T, les pertes spécifiques sont corrigées par un coefficient K_{Bp} dont sa valeur est donnée par le tableau III.1

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

Tableau III.1

Dans notre cas on a : $B_c = 1,68 \text{ T}$, donc $K_{Bp} = 0.0536 \cdot e^{1.95 B_c}$

$$K_{Bp} = 0.0536 \times e^{1.95 \times 1.68}$$

$$K_{Bp} = 1,41$$

$$P'_0 = 0,97 \times 1,41 \times 788,7$$

$$P'_0 = 1078,7 \text{ W}$$

III.1.1. 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.

$$P_{s1} = 0,5 \cdot \gamma_{1.5} \cdot K_{Bp} \cdot G_1 \text{ [W]} \quad (\text{III. 6})$$

$$P_{s1} = 0,5 \times 0,97 \times 1,41 \times 240,2$$

$$P_{s1} = 164,3 \text{ W}$$

➤ **Pertes supplémentaires dans les colonnes et les culasses P_{s2} :**

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

$$P_{s2} = 0,15 \cdot \gamma_{1.5} \cdot K_{BP} \cdot (G_2 + G_3) [\text{W}] \quad (\text{III. 7})$$

$$P_{s2} = 0,15 \times 0,97 \times 1,14 \times (172,9 + 375,6)$$

$$P_{s2} = 90,9 \text{ W}$$

▪ **Les pertes totales à vides P_0 :**

$$P_0 = P'_0 + P_{s1} + P_{s2} [\text{W}] \quad (\text{III. 8})$$

$$P_0 = 1078,7 + 164,3 + 90,9$$

$$P_0 = 1333,9 \text{ W}$$

➤ $P_0 < P_{0g}$, donc les pertes à vides sont conformes

▪ P_{0g} : Pertes garantie par le cahier de charge

III.1.2. Pertes dans le cuivre :

Pour calculer les pertes dans le cuivre ou les pertes joules, on doit d'abord déterminer la résistance des enroulements Haute tension et Basse Tension.

III.1.2.a. Calcul des résistances des enroulements :

1) Enroulement Haute Tension :

$$R'_1 = \frac{\rho_{75^\circ} \cdot L_1}{S_1} [\Omega] \quad (\text{III. 9})$$

- ρ_{75° : Résistivité du cuivre à 75° , $\rho_{75^\circ} = 0,0215 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$
- S_1 : Section du conducteur à haut tension.
- L_1 : Longueur totale de l'enroulement.

$$L_1 = n \cdot L_{m1} [\text{m}] \quad (\text{III. 10})$$

- n : Nombre de spires coté Haute Tension.
- L_{m1} : Longueur moyenne de la spire.

$$L_{m1} = \pi \cdot D_{m1} [\text{mm}] \quad (\text{III. 11})$$

- **Calcul du diamètre moyen de la spire D_{m1} :**

$$D_{m1} = D + 2a_{20} + 2 \cdot a_{21} + 2 \cdot a_2 + a_1 [\text{mm}] \quad (\text{III. 12})$$

$$D_{m1} = 198,4 + 2 \times 12 + 2 \times 10 + 2 \times 33,8 + 35,8$$

$$\mathbf{D_{m1} = 345,8 \text{ mm}}$$

- **Calcul de L_{m1} :**

$$L_{m1} = 3,14 \times 345,8$$

$$\mathbf{L_{m1} = 1086 \text{ mm}}$$

- **Calcul de L_1 :**

$$L_1 = 971 \times 1086 \times 10^{-3}$$

$$\mathbf{L_1 = 1054,5 \text{ m}}$$

D'où

$$R'_1 = \frac{0,0215 \times 10^{-6} \times 1054,5}{6,16 \times 10^{-6}}$$

$$\mathbf{R'_1 = 3,68 \ \Omega}$$

Comme l'enroulement Haute Tension est reparti en deux groupe en parallèle, donc en calculera la résistance équivalente de deux résistance en parallèle.

- **Calcul de la résistance équivalente :**

$$R_1 = \frac{R'_1}{2} = \frac{3,68}{2}$$

$$\mathbf{R_1 = 1,84 \ \Omega}$$

2) Enroulements Basse Tension :

Comme le transformateur que nous calculons possède au secondaire deux enroulements (deux phases) repartis sur les trois colonnes, on aura deux résistances.

2.a) La première phase :

L'enroulement de la première phase se compose de trois groupes de spires repartis sur les trois colonnes $\{(n_1 - x), x, x\}$.

- **Résistance de $(n_1 - x)$ spires (R_{21}) :**

$$R_{21} = \frac{\rho_{75^\circ} \cdot L_{21}}{S_2} [\Omega] \quad (\text{III. 13})$$

- L_{21} : Longueur de groupe de spires $(n_1 - x)$.

$$L_{21} = (n_1 - x) \cdot L_{m21} [\text{m}] \quad (\text{III. 14})$$

- L_{m21} : Longueur moyenne du groupe de spires $(n_1 - x)$.

$$L_{m21} = \pi \cdot D_{m21} [\text{mm}] \quad (\text{III. 15})$$

- **Calcul du diamètre moyen groupe de spires $(n_1 - x) D_{m21}$:**

$$D_{m21} = D + 2 \cdot a_{20} + a_2 [\text{mm}] \quad (\text{III. 16})$$

$$D_{m21} = 198,4 + 2 \times 12 + 33,8$$

$$\mathbf{D_{m21} = 256,2 \text{ mm}}$$

- **Calcul de L_{m21} :**

$$L_{m21} = 3,14 \times 256,2$$

$$\mathbf{L_{m21} = 804,4 \text{ mm}}$$

- **Calcul de L_{21} :**

$$L_{21} = 177 \times 804,4 \times 10^{-3}$$

$$\mathbf{L_{21} = 142,4 \text{ m}}$$

D'où

$$R_{21} = \frac{0,0215 \times 10^{-6} \times 142,4}{43,8 \times 10^{-6}}$$

$$\mathbf{R_{21} = 0,07 \Omega}$$

- **Résistance de (x) spires (R_{22}) :**

$$R_{22} = \frac{\rho_{75^\circ} \cdot L_{22}}{S_2} [\Omega] \quad (\text{III. 17})$$

- L_{22} : Longueur de groupe de spires (x) .

$$L_{22} = x \cdot L_{m22} [\text{m}] \quad (\text{III. 18})$$

- L_{m22} : Longueur moyenne du groupe de spires (x).

$$L_{m22} = \pi \cdot D_{m22} [\text{mm}] \quad (\text{III. 19})$$

- **Calcul du diamètre moyen groupe de spires (x) D_{m22} :**

$$D_{m22} = D + 2 \cdot a_{20} + 2 \cdot [N_{2c3} \cdot a' + 2 \cdot e_{psp} + C_2] + 2 \cdot C'_2 + [N_{2c2} \cdot a' + e_{psp}] \quad [\text{mm}] \quad (\text{III. 20})$$

$$D_{m22} = 198,4 + 2 \times 12 + 2 \times (4 \times 4,05 + 2 \times 0,5 + 2) + 2 \times 6 + (2 \times 4,05 + 0,5)$$

$$\mathbf{D_{m22} = 281,4 \text{ mm}}$$

- **Calcul de L_{m22} :**

$$L_{m22} = 3,14 \times 281,4$$

$$\mathbf{L_{m22} = 883,6 \text{ mm}}$$

- **Calcul de L_{22} :**

$$L_{22} = 88 \times 883,6 \times 10^{-3}$$

$$\mathbf{L_{22} = 77,75 \text{ m}}$$

D'où

$$R_{22} = \frac{0,0215 \times 10^{-6} \times 77,75}{43,8 \times 10^{-6}}$$

$$\mathbf{R_{22} = 0,038 \ \Omega}$$

➤ **Calcul de la résistance totale de la première phase du secondaire :**

$$R_{2ph1} = R_{21} + 2 \cdot R_{22} \quad (III. 21)$$

$$R_{2ph1} = 0,07 + 2 \times 0,038$$

$$R_{2ph1} = 0,14 \, \Omega$$

2.b) La deuxième phase :

L'enroulement de la deuxième phase se compose de deux groupes de spires repartis sur la deuxième et la troisième colonne $\{n_2, n_2\}$.

▪ **Résistance de (n_2) spires (R_{23}) :**

$$R_{23} = \frac{\rho_{75^\circ} \cdot L_{23}}{S_2} [\Omega] \quad (III. 22)$$

▪ L_{23} : Longueur de groupe de spires (n_2).

$$L_{23} = x \cdot L_{m23} [m] \quad (III. 23)$$

▪ L_{m23} : Longueur moyenne du groupe de spires (n_2).

$$L_{m23} = \pi \cdot D_{m23} [mm] \quad (III. 24)$$

▪ **Calcul du diamètre moyen groupe de spires (n_2) D_{m23} :**

$$D_{m23} = D + 2 \cdot a_{20} + [N_{2c3} \cdot a' + 2 \cdot e_{psp} + C_2] [mm] \quad (III. 25)$$

$$D_{m23} = 198,4 + 2 \times 12 + (4 \times 4,05 + 2 \times 0,5 + 2)$$

$$D_{m23} = 241,6 \, mm$$

➤ **Calcul de L_{m23} :**

$$L_{m23} = 3,14 \times 241,6$$

$$L_{m23} = 758,6 \, mm$$

➤ **Calcul de L_{23} :**

$$L_{23} = 153 \times 758,6 \times 10^{-3}$$

$$L_{23} = 116,06 \, m$$

D'où

$$R_{23} = \frac{0,0215 \times 10^{-6} \times 116,06}{43,8 \times 10^{-6}}$$

$$R_{23} = 0,057 \, \Omega$$

➤ **Calcul de la résistance totale de la deuxième phase du secondaire :**

$$R_{2ph2} = 2 \cdot R_{23} \quad (III. 26)$$

$$R_{2ph2} = 2 \times 0,38$$

$$R_{2ph2} = 0,14 \, \Omega$$

III.1.2.b. Poids total du cuivre :

1) Poids de l'enroulement Haute Tension :

$$G_{c1} = \gamma \cdot L_1 \cdot S_1 \text{ [kg]} \quad (III. 27)$$

▪ γ : Poids spécifique du cuivre, $\gamma = 8,9 \, \text{kg/dm}^3$

$$G_{c1} = 8,9 \times 1054,5 \times 10 \times 6,16 \times 10^{-4}$$

$$G_{c1} = 57,8 \, \text{kg}$$

2) Poids de l'enroulement Basse Tension :

2.a) La première phase :

$$G_{c2ph1} = \gamma \cdot L_{2pah1} \cdot S_2 \text{ [kg]} \quad (III. 28)$$

L_{2pah1} : Longueur totale de l'enroulement de la première phase du secondaire.

$$L_{2pah1} = L_{21} + 2 \cdot L_{22} \text{ [m]} \quad (III. 29)$$

$$L_{2pah1} = 142,4 + 2 \times 77,75$$

$$L_{2pah1} = 297,8 \, \text{m}$$

$$G_{c2ph1} = 8,9 \times 297,8 \times 10 \times 43,8 \times 10^{-4}$$

$$G_{c2ph1} = 109,07 \, \text{kg}$$

2.b) La deuxième phase :

$$G_{c2ph2} = \gamma \cdot L_{2pah2} \cdot S_2 \text{ [kg]} \quad (\text{III. 30})$$

L_{2pah2} : Longueur totale de l'enroulement de la deuxième phase du secondaire.

$$L_{2pah2} = 2 \cdot L_{23} \text{ [m]} \quad (\text{III. 31})$$

$$L_{2pah2} = 2 \times 116.06$$

$$L_{2pah2} = 232.12 \text{ m}$$

$$G_{c2ph2} = 8.9 \times 232.12 \times 10 \times 43.8 \times 10^{-4}$$

$$G_{c2ph2} = 90.48 \text{ kg}$$

➤ Calcul du poids total du cuivre :

$$G_c = [3 \cdot G_{c1}] + [G_{c2ph1} + G_{c2ph2}] \text{ [kg]} \quad (\text{III. 32})$$

$$G_c = [3 \times 57,8] + [109.07 + 90.48]$$

$$G_c = 372.95 \text{ kg}$$

III.1.2.c Calcul des différentes pertes de l'enroulement Haute Tension :**1) Pertes Joule P'_{cc1} :**

$$P'_{cc1} = m \cdot K \cdot G_{c1} \cdot J_1^2 \text{ [W]} \quad (\text{III. 33})$$

- J_1 : Densité du courant primaire.
- m : Nombre de phase
- K : Facteur tenant compte de la conductivité du cuivre à une température de 75° , sa valeur est donnée comme suit :

$$K = \begin{cases} 2.4 & \text{pour le cuivre} \\ 12.16 & \text{pour l'aluminium} \end{cases}, \text{ on prend } K = 2,4$$

$$P'_{cc1} = 3 \times 2,4 \times 57,8 \times 2,17^2$$

$$P'_{cc1} = 1959 \text{ W}$$

2) Pertes supplémentaires de l'enroulement Haute Tension :**2.a) Pertes externes :**

Ces pertes sont dues aux isolateurs, aux pièces de sortie et aux bornes de connexion, elles sont données par le (tableau III.2).

D'après le tableau III.2, $P_{ex} = 10 \text{ W}$

D[mm]	A[mm]	S _n [KVA]	Courant Basse Tension[A]	P _{ex} sans antinit	P _{ex} [w] avec antinil	
					a=20[mm]	a=30[mm]
28	150	10–30	<43	0		
		50	72.2	5		
		75	103.3	10		
		100	144.3	20		
		125	180.4	30		
45	150	160	231	40		
		200	280	50		
		250	401	70		
		315	455	110		
		400	577	160		
56	150	500	722		100	90
		630	909		160	150
70	150	800	1155		190	170
		1000	1443		290	280
		1250	1804		450	430
90	165	1600	2309		560	540

Tableau III.2

2.b) Pertes internes :

$$P_{in} = \frac{e \cdot K \cdot J_1^2 \cdot 3 \cdot G_{c1}}{n} \text{ [w]} \quad (\text{III. 34})$$

- e : Facteur tenant compte des pertes supplémentaires, des pertes dans la cuve et la partie constructive du noyau.

Ce facteur est donné par le (tableau III.3), on prend $e = 1,04$

Intensité du courant Secondaire [A]	e
30–100	1.04
101–400	1.05
401–700	1.07
701–1200	1.09
1201–1500	1.12
1501–1800	1.15
1801–2400	1.20

Tableau III.3

➤ Calcul de P_{in} :

$$P_{in} = \frac{1,04 \times 2,4 \times 2,17^2 \times 3 \times 57,8}{971}$$

$$P_{in} = 2,09 \text{ W}$$

2.c) Pertes par connexion : P_{con1}

Ce sont les pertes dues à la résistance des fils qui relient les différentes phases du transformateur, elles sont données par la formule suivante :

$$P_{con1} = R_{con1} \cdot I_{ph1}^2 [\text{W}] \quad (\text{III.35})$$

- R_{con1} : La résistance du fil de connexion de l'enroulement Haute Tension, elle est donnée par :

$$R_{con1} = \frac{\rho_{75^\circ} \cdot L_{con1}}{S_{1 \text{ fil/con}}} [\Omega] \quad (\text{III.36})$$

- $S_{fil/con}$: Section des fils de connexion, elle est égale à la section du conducteur de l'enroulement Haute Tension.
- L_{con1} : Longueur des fils de connexion de l'enroulement Haute Tension, elle est donnée par la formule suivante :

$$L_{con1} = 7,5 \cdot h_{B2} [\text{m}] \quad (\text{III.37})$$

➤ **Calcul de L_{con1} :**

$$L_{con1} = 7,5 \times 494 \times 10^{-3}$$

$$L_{con1} = 3,705 \text{ m}$$

➤ **Calcul de R_{con1} :**

$$R_{con1} = \frac{0,0215 \times 10^{-6} \times 3,705}{6,16 \times 10^{-6}}$$

$$R_{con1} = 0,013 \Omega$$

➤ **Calcul de P_{con1} :**

$$P_{con1} = 0,013 \times 26,7^2$$

$$P_{con1} = 9,26 \text{ W}$$

2.d) Pertes par effet pelliculaire P_{sup1} :

Les pertes par effet pelliculaire sont dues à l'existence de l'effet de peau électrique, elles sont données par la relation suivante :

$$P_{sup1} = m \cdot (K_{mr1} - 1) \cdot R_1 \cdot I_{ph1}^2 \quad (\text{III. 38})$$

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

$$K_{mr1} = 1 + \frac{m_{c1}^2 - 0,2}{9} \cdot (\alpha_1 \cdot d'_{nu})^4 \quad (\text{III. 39})$$

- d'_{nu} : Diamètre nu du fil rond
- m_{c1} : Nombres de conducteurs dans le sens radial, elle est égal au nombre de couches de l'enroulement Haute tension.
- α_1 : Facteur donné par la formule suivante :

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{n_{c1} \cdot d'_{nu} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0}{H_c \cdot 2 \cdot \rho_{75^\circ}}} \quad [\text{m}^{-1}] \quad (\text{III. 40})$$

- ❖ n_{c1} : Nombre de conducteur Haute Tension dans le sens de la hauteur, il est égal au nombre de spires par couche.
- ❖ H_c : La hauteur de la fenêtre

➤ **Calcul de α_1 :**

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{8 \times 19 \times 2,8 \times 10^{-3} \times 2 \times 3,14 \times 50 \times 4 \times 3,14 \times 10^{-7}}{594 \times 10^{-3} \times 2 \times 0,0215 \times 10^{-6}}}$$

$$\alpha_1 = 81,06 \text{ m}^{-1}$$

➤ **Calcul de K_{mr1} :**

$$K_{mr1} = 1 + \frac{13^2 - 0,2}{9} \times (81,06 \times 2,8 \times 10^{-3})^4$$

$$K_{mr1} = 1,049$$

➤ **Calcul de P_{sup1} :**

$$P_{sup1} = 3 \times (1,049 - 1) \times 1,84 \times 26,7^2$$

$$P_{sup1} = 192,82 \text{ W}$$

III.1.2.d. Pertes totales dans le cuivre pour l'enroulement Haute Tension

$$P_{cc1} = P'_{cc1} + P_{ex} + P_{in} + P_{con1} + P_{sup1} \text{ [W]} \quad (\text{III. 41})$$

$$P_{cc1} = 1959 + 10 + 2,09 + 9,26 + 192,82$$

$$P_{cc1} = 2173 \text{ W}$$

III.1.2.e. Calcul des différentes pertes des enroulements Basse Tension :

1) Pertes Joule P'_{cc2} :

1.a) Pour l'enroulement de la première phase P'_{cc2ph1} :

$$P'_{cc2ph1} = K \cdot G_{c2ph1} \cdot J_{m2}^2 \text{ [W]} \quad (\text{III. 42})$$

▪ J_{m2} : Densité du courant secondaire.

$$P'_{cc2ph1} = 2,4 \times 109,07 \times 2,23^2$$

$$P'_{cc2ph1} = 1302 \text{ W}$$

1.b) Pour l'enroulement de la deuxième phase P'_{cc2ph2} :

$$P'_{cc2ph2} = K \cdot G_{c2ph2} \cdot J_{m2}^2 \text{ [W]} \quad (\text{III. 43})$$

$$P'_{cc2ph2} = 2,4 \times 90,48 \times 2,23^2$$

$$P'_{cc2ph2} = 1080 \text{ W}$$

2) Les pertes supplémentaires des enroulements Basse Tension :

2.a) Pertes par connexion P_{con2} :

$$P_{con2} = R_{con2} \cdot J_{ph1}^2 \text{ [W]} \quad (\text{III. 44})$$

- J_{ph1} : Courant des phases de secondaire.
- R_{con2} : La résistance du fil de connexion des enroulements Basse Tension.

$$R_{con2} = \frac{\rho_{75^\circ} \cdot L_{con2}}{S_{2fil/con}} [\Omega] \quad (III. 45)$$

- $S_{2fil/con}$: Section des fils de connexion, elle est égale à la section des conducteurs des enroulements secondaires.
- L_{con2} : La longueur des fils de connexion des enroulements basse tension.

$$L_{con2} = 7,5 \cdot h_{B2} \quad [m] \quad (III. 46)$$

$$L_{con2} = 7,5 \times 494 \times 10^{-3}$$

$$L_{con2} = 3.705 \text{ m}$$

$$R_{con2} = \frac{0.0215 \times 10^{-6} \times 3.705}{43,8 \times 10^{-6}} [\Omega]$$

$$R_{con2} = 1.82 \times 10^{-3} \Omega$$

$$P_{con2} = 1.82 \times 10^{-3} \times 97.8^2$$

$$P_{con2} = 17.4 \text{ W}$$

2.b) Pertes par effet pelliculaire P_{sup2} :

- L'enroulement de la première phase :

1) Pour le groupe de spires $(n_1 - x)$:

$$P_{sup2ph11} = (K_{mr21} - 1) \cdot R_{21} \cdot J_{ph1}^2 \quad [W] \quad (III. 47)$$

- K_{mr21} : Coefficient de majoration de la résistance en courant alternatif.

Pour un conducteur méplat, ce coefficient est donné par :

$$K_{mr21} = 1 + \frac{m_{c21}^2 - 0.2}{9} (\alpha_2 \cdot a)^4 \quad (III. 48)$$

- m_{c21} : Nombre de conducteurs dans le sens radial pour le groupe de spires $(n_1 - x)$, il est égal au nombre de couches.
- a : Epaisseur du conducteur Basse Tension (sans isolation).
- α_2 : Facteur donné par la relation suivante :

$$\alpha_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot n_{c2} \cdot b}{2 \cdot H_c \cdot \rho_{75}}} \text{ [m}^{-1}\text{]} \quad (\text{III. 49})$$

- n_{c2} : Nombre de conducteurs Basse Tension dans le sens de la hauteur.
- H_c : Hauteur de la fenêtre en mm.
- b : Largeur du conducteur nu Basse Tension.

$$\alpha_2 = \sqrt{\frac{2 \times 3.14 \times 50 \times 4 \times 3.14 \times 10^{-7} \times 37 \times 12.5}{2 \times 594 \times 0.0215 \times 10^{-6}}}$$

$$\alpha_2 = 84.5 \text{ m}^{-1}$$

$$K_{mr21} = 1 + \frac{5^2 - 0.2}{9} (84.5 \times 3.55 \times 10^{-3})^4$$

$$K_{mr21} = 1.02$$

$$P_{sup2ph11} = (1.02 - 1) \times 0.07 \times 97.8^2$$

$$P_{sup2ph11} = 13.4 \text{ W}$$

2) Pour le groupe de spires (x) :

$$P_{sup2ph12} = (K_{mr22} - 1) \cdot R_{22} \cdot J_{ph1}^2 \quad [\text{W}] \quad (\text{III. 50})$$

$$K_{mr21} = 1 + \frac{m_{c22}^2 - 0.2}{9} (\alpha_2 \cdot a)^4 \quad (\text{III. 51})$$

- m_{c22} : Nombre de conducteurs dans le sens radial pour le groupe de spire (x), il est égal au nombre de couches.

$$K_{mr21} = 1 + \frac{2^2 - 0.2}{9} (84.5 \times 3.55 \times 10^{-3})^4$$

$$K_{mr21} = 1.003$$

$$P_{sup2ph12} = (1.003 - 1) \times 0.038 \times 97.8^2$$

$$P_{\text{sup2ph12}} = 1.1 \text{ W}$$

➤ **Les pertes par effet pelliculaire dans la première phase du secondaire :**

$$P_{\text{sup2ph1}} = P_{\text{sup2ph11}} + 2 \cdot P_{\text{sup2ph12}} \text{ [W]} \quad (\text{III. 52})$$

$$P_{\text{sup2ph1}} = 13.4 + 2 \times 1.1$$

$$P_{\text{sup2ph1}} = 15.6 \text{ W}$$

▪ **L'enroulement de la deuxième phase :**

$$P_{\text{sup2ph2}} = 2 \cdot (K_{\text{mr23}} - 1) \cdot R_{23} \cdot J_{\text{ph2}}^2 \text{ [W]} \quad (\text{III. 53})$$

$$K_{\text{mr23}} = 1 + \frac{m_{\text{c23}}^2 - 0.2}{9} (\alpha_2 \cdot a)^4 \quad (\text{III. 54})$$

$$K_{\text{mr23}} = 1 + \frac{4^2 - 0.2}{9} (84.5 \times 3.55 \times 10^{-3})^4$$

$$K_{\text{mr23}} = 1.014$$

$$P_{\text{sup2ph2}} = 2 \times (1.014 - 1) \times 0.057 \times 97.8^2$$

$$P_{\text{sup2ph2}} = 15.26 \text{ W}$$

III.1.2.f. Calcul des pertes totales des enroulements Basse Tension :

1) **Enroulement de la première phase :**

$$P_{\text{cc2ph1}} = P'_{\text{cc2ph1}} + P_{\text{con2}} + P_{\text{sup2ph1}} \text{ [W]} \quad (\text{III. 55})$$

$$P_{\text{cc2ph1}} = 1302 + 17.4 + 15.6$$

$$P_{\text{cc2ph1}} = 1335 \text{ W}$$

2) **Enroulement de la deuxième phase :**

$$P_{\text{cc2ph2}} = P'_{\text{cc2ph2}} + P_{\text{con2}} + P_{\text{sup2ph2}} \text{ [W]} \quad (\text{III. 56})$$

$$P_{\text{cc2ph2}} = 1080 + 17.4 + 15.26$$

$$P_{\text{cc2ph2}} = 1113 \text{ W}$$

3) **Pertes totales des enroulements Basse Tension :**

$$P_{\text{cc2}} = P_{\text{cc2ph1}} + P_{\text{cc2ph2}} \text{ [W]} \quad (\text{III. 57})$$

$$P_{cc2} = 2448 \text{ W}$$

III.1.2.g. Calcul des pertes totales dans le cuivre :

$$P_{cc} = P_{cc1} + P_{cc2} \text{ [W]} \quad (\text{III. 58})$$

$$P_{cc} = 2173 + 2448$$

$$P_{cc} = 4621 \text{ W}$$

- $P_{cc} < P_{ccg}$, donc les pertes en court circuit sont conformes
- P_{ccg} : Pertes garanties par le cahier de charge

III.1.2.h. Calcul définitif de la tension de court circuit:

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

Avec :

$$U_{cca} = \frac{4,621}{800} \times 100$$

$$U_{cca} = 0,57 \%$$

$$U_{cc} = \sqrt{0,57^2 + 6,07^2}$$

$$U_{cc} = 6,09 \%$$

III.2. Calcul du courant à vide :

Le courant à vide est le courant absorbé lorsque le transformateur est alimenté sous sa tension nominale.

Il comporte deux composantes l'une réactive appelé aussi courant magnétisant, et l'autre active.

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

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2} \text{ [A]} \quad (\text{III. 59})$$

- I_{0a} : Composante active
- I_{0r} : Composante réactive

III.2.1. Calcul de la composante active I_{0a} :

En fonctionnement à vide, le transformateur consomme une puissance active qui correspond aux pertes dans le fer.

Cette puissance active est donnée par la formule suivante :

$$P_0 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_{0a} [\text{W}] \quad (\text{III. 60})$$

D'où

$$I_{0a} = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_1} = \frac{1333.9}{\sqrt{3} \times 10 \times 10^3}$$

$$I_{0a} = 0,077 \text{ A}$$

III.2.2. Calcul de la composante réactive I_{0r} :

En fonctionnement à vide, le transformateur consomme en plus de la puissance active une puissance réactive qui sert à la production du flux commun et du flux de fuite aux deux enroulements.

Cette puissance réactive est donnée par la formule suivante :

$$Q_t = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_{0r} [\text{VAR}] \quad (\text{III. 61})$$

III.2.2.a. Calcul de la puissance réactive totale Q_t :

Pour calculer la puissance réactive totale, il faut d'abord déterminer la puissance réactive pour chaque partie du noyau.

1) Dans les coins :

$$Q_{\text{coi}} = Q_0 \cdot G_1 \cdot K_{Bp} [\text{VAR}] \quad (\text{III. 62})$$

- Q_0 : Pertes spécifiques des tôles utilisées à l'ENEL, elles sont évaluées à $1,9 \text{ VAR/kg}$
- G_1 : Poids des coins.
- K_{Bp} : Facteur correcteur de l'induction

$$Q_{\text{coi}} = 1,9 \times 240,2 \times 1,41$$

$$Q_{\text{coi}} = 643.5 \text{ VAR}$$

2) Dans les culasses :

$$Q_{\text{cul}} = Q_0 \cdot G_2 \cdot K_{Bp} [\text{VAR}] \quad (\text{III. 63})$$

$$Q_{\text{cul}} = 1,9 \times 172.9 \times 1,41$$

$$Q_{cul} = 463,2 \text{ VAR}$$

1) Dans les colonnes :

$$Q_{col} = Q_0 \cdot G_3 \cdot K_{Bp} [\text{VAR}] \quad (\text{III. 64})$$

$$Q_{col} = 1,9 \times 375,6 \times 1,41$$

$$Q_{col} = 1006,2 \text{ VAR}$$

➤ Calcul de la puissance réactive totale :

$$Q_{tot} = Q_{coi} + Q_{cul} + Q_{col} [\text{VAR}] \quad (\text{III. 65})$$

$$Q_{tot} = 643,5 + 463,2 + 1006,2$$

$$Q_{tot} = 2112,9 \text{ VAR}$$

D'où

$$I_{or} = \frac{Q_t}{\sqrt{3} \cdot U_1} = \frac{2112,9}{\sqrt{3} \times 10 \times 10^3}$$

$$I_{or} = 0,122 \text{ A}$$

➤ Calcul du courant à vide :

$$I_0 = \sqrt{0,077^2 + 0,122^2}$$

$$I_0 = 0,144 \text{ A}$$

III.2.3. Calcul du rapport $\frac{I_0}{I_n}$:

$$\frac{I_0}{I_n} \cdot 100 = \frac{I_0}{I_{ph1} \cdot \sqrt{3}} \cdot 100 = \frac{0,144}{26,7 \times \sqrt{3}} \cdot 100$$

$$\frac{I_0}{I_n} = 0,31 \%$$

➤ $\left(\frac{I_0}{I_n}\right) < \left(\frac{I_0}{I_n}\right)_g$, donc le courant à vide est conforme

III.3. Calcul du rendement [1, 3, 4, 5, 10]:

Comme toute machine électrique, le transformateur engendre des pertes ; de ce fait la puissance qu'il délivre est inférieure à celle qu'on lui fournit.

Et par définition, le rendement d'un transformateur est égal au rapport entre la puissance active qu'il fournit à la charge et la puissance active que le réseau d'alimentation lui fournit.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 [\%] \quad (\text{III. 66})$$

- P_2 : La puissance active que le transformateur fournit à la charge, elle est définie comme suit :

$$P_2 = 2 \cdot V_1' \cdot J_2 \cdot \cos \varphi_2 [\text{W}] \quad (\text{III. 67})$$

- P_1 : La puissance active que le réseau d'alimentation fournit au transformateur

$$P_1 = P_2 + P_0 + P_{cu} [\text{W}] \quad (\text{III. 68})$$

D'où

$$\eta(\%) = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + P_{cu}} \cdot 100$$

$$\eta(\%) = \left(1 - \frac{P_0 + P_{cu}}{P_2 + P_0 + P_{cu}} \right) \cdot 100 \quad (\text{III. 69})$$

Avec :

$$P_{cu} = 2 \cdot R \cdot J_2^2 \quad (\text{III. 70})$$

$$P_{cu} = 2 \cdot R \cdot J_2^2 \cdot \left(\frac{J_{cc}^2}{J_{cc}^2} \right)$$

- J_2 : Courant secondaire pour une charge donnée.
- J_{cc} : Courant de court-circuit.

On pose : $\alpha = \frac{J_2}{J_{cc}}$

- α : Coefficient de charge.

L'équation (III. 70) devient:

$$P_{cu} = 2 \cdot R \cdot \alpha^2 \cdot J_{cc}^2$$

En remplaçant $P_{cc} = 2 \cdot R \cdot J_{cc}^2$ dans l'équation (III. 70), et $J_2 = J_{cc} \cdot \alpha$ dans l'équation (III. 67) on obtient :

$$\begin{cases} P_{cu} = \alpha^2 P_{cc} \\ P_2 = 2 \cdot V_1' \cdot J_{cc} \cdot \alpha \cdot \cos \varphi_2 \end{cases}$$

En posant : $J_{cc} = J_{2n}$ on obtient :

$$P_2 = S_n \cdot \alpha \cdot \cos \varphi_2 [\text{W}] \quad (\text{III. 71})$$

Ainsi, le rendement devient :

$$\eta(\%) = \left(1 - \frac{P_0 + \alpha^2 P_{cc}}{S_n \cdot \alpha \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \alpha^2 P_{cc}}\right) \cdot 100 \quad (\text{III. 72})$$

III.3.1. Le rendement maximal :

Le rendement maximal est obtenu pour $\frac{d\eta}{d\alpha} = 0$

Après la démonstration qui se trouve en annexe2 on aura :

$$P_0 = \alpha^2 \cdot P_{cc}$$

D'où :

$$\alpha = \sqrt{\frac{P_0}{P_{cc}}} \quad (\text{III. 73})$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{1333.9}{4621}}$$

$$\alpha = 0.53$$

Nous nous proposons de déterminer les caractéristiques du rendement pour les charges résistive et inductive.

III.3.2. Rendement pour une charge purement résistive ($\cos \varphi_2 = 1$):

α	$\alpha^2 \cdot P_{cc}$ [kW]	$P_0 + \alpha^2 P_{cc}$ [kW]	$S_n \cdot \alpha \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \alpha^2 P_{cc}$ [kW]	η %
0,25	0,288	1.621	201.621	99.19
0,40	0.739	2.072	322.072	99.35
0,53	1.298	2.631	426.631	99.38
0,75	2.599	3.932	603.932	99.34
1	4.621	5.954	805.954	99.26

Tableau III.4

La caractéristique du rendement pour la charge résistive est présentée dans la figure III.2.

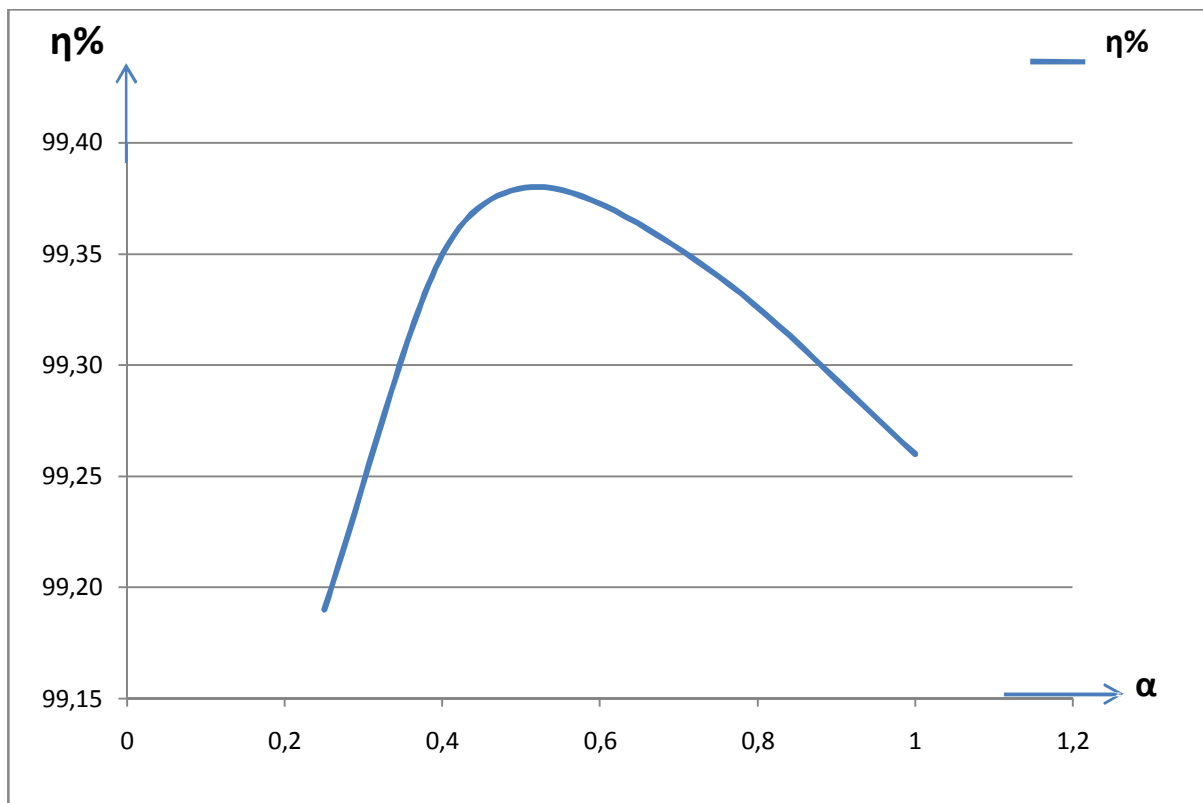


Figure III.2. Caractéristique du rendement (charge résistive).

III.3.3. Rendement pour une charge purement inductive ($\cos\varphi_2 = 0.8$ AR):

α	$\alpha^2 \cdot P_{cc}$ [kW]	$P_0 + \alpha^2 P_{cc}$ [kW]	$S_n \cdot \alpha \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \alpha^2 P_{cc}$ [kW]	η %
0,25	0,288	1.621	161.621	98.99
0,40	0.739	2.072	258.072	99.19
0,53	1.298	2.631	341.831	99.23
0,75	2.599	3.932	483.932	99.18
1	4.621	5.954	645.954	99.07

Tableau III.5

La caractéristique du rendement pour la charge inductive est présentée dans la figure III.3.

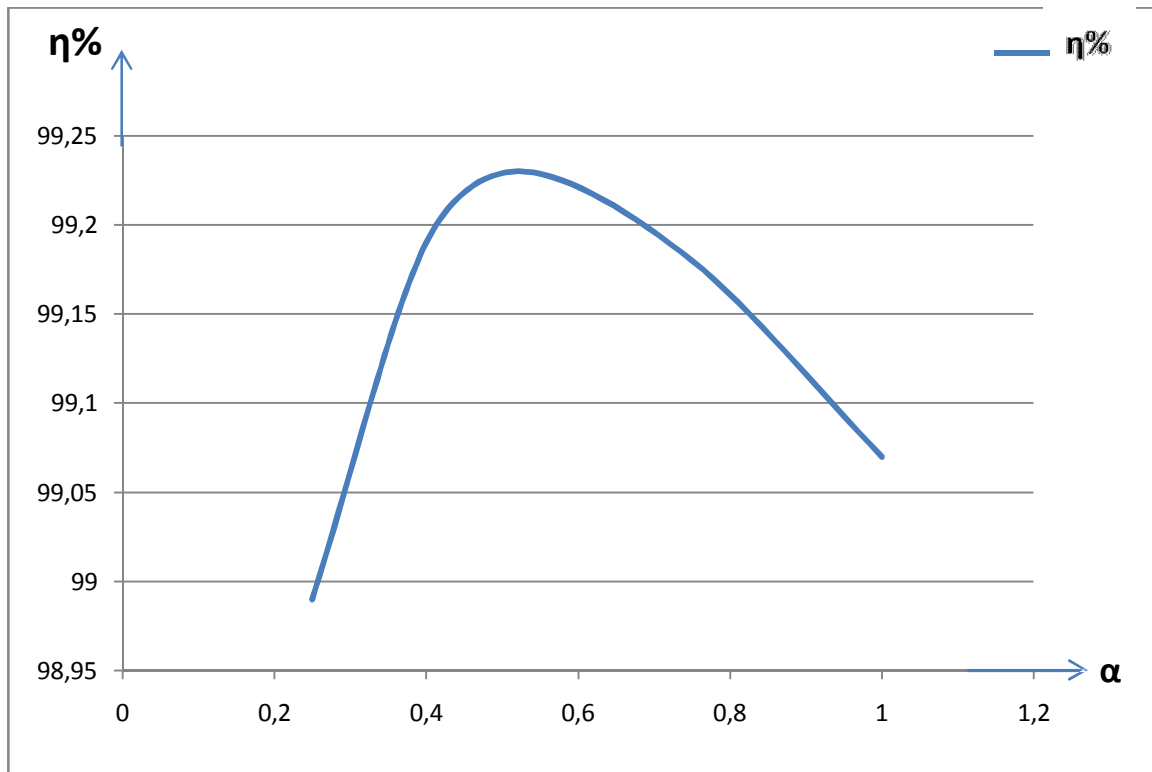


Figure III.3. Caractéristique du rendement (charge Inductive).

III.4. Calcul de la chute de tension [2, 9, 12]:

La chute de tension est donnée par la relation suivante :

$$\Delta U_{\%} = \frac{\Delta U}{V'_{1n}} \cdot 100 \quad (\text{III.74})$$

Avec :

$$\Delta U = V'_{1n} - V'_1 \text{ [V]} \quad (\text{III.75})$$

- V'_{1n} : Tension nominale au secondaire.
- V'_1 : Tension secondaire pour une charge donnée.

D'après la relation (III.74) La valeur de ΔU peut être positive ou négative.

D'où :

$$\Delta U = \frac{V'_{1n} \cdot \Delta U_{\%}}{100} \text{ [V]}$$

Et :

$$V'_1 = V'_{1n} - \frac{V'_{1n} \cdot \Delta U_{\%}}{100}$$

$$V'_1 = V'_{1n} \cdot \left(1 - \frac{\Delta U_{\%}}{100}\right) [V]$$

Pour un régime nominal, la chute de tension peut s'exprimer comme suit :

$$\Delta U_{\%} = U_{cca} \cos \varphi_2 + U_{ccr} \sin \varphi_2 + \frac{1}{200} (U_{ccr} \cos \varphi_2 - U_{cca} \sin \varphi_2)^2 \quad (\text{III. 76})$$

Généralement le dernier terme est négligeable, on aura donc :

$$\Delta U_{\%} = U_{cca} \cos \varphi_2 + U_{ccr} \sin \varphi_2 \quad (\text{III. 77})$$

Pour un régime quelconque de charge, la chute de tension s'exprime par la relation suivante :

$$\Delta U_{\%} = \alpha \cdot (U_{cca\%} \cos \varphi_2 + U_{ccr\%} \sin \varphi_2) \quad (\text{III. 78})$$

- α : Le coefficient de charge, il est défini comme suit :

$$\alpha = \frac{S_{ch}}{S_n} = \frac{V'_1 \cdot J_2}{V'_{1n} \cdot J_{2n}} \quad (\text{III. 79})$$

- S_{ch} : Puissance apparente du secondaire
- S_n : Puissance apparente nominale du secondaire

Donc :

$$J_2 = \frac{\alpha \cdot S_n}{2 \cdot V'_1}$$

Nous nous proposons de déterminer les caractéristiques en charge pour les charges résistive, inductive et capacitive.

III.4.1. La chute de tension pour une charge purement résistive ($\cos \varphi_2 = 1$):

$$\begin{cases} S_n = 800 [\text{kVA}] \\ V'_{1n} = 2,73 [\text{kV}] \\ U_{cca\%} = 0,57 [\%] \\ U_{ccr\%} = 6,07 [\%] \end{cases}$$

$$\triangleright \Delta U(\%) = \alpha \times 0,57$$

α	$\Delta U \%$	$\Delta U [V]$	$V_1' [V]$	$J_2 [A]$
0,25	0,142	3,876	2726,123	36,682
0,4	0,228	6,224	2723,775	58,742
0,53	0,302	8,244	2721,755	77,890
0,75	0,427	11,657	2718,342	110,361
1	0,570	15,561	2714,439	147,360

Tableau III .6.

La caractéristique en charge pour une charge résistive est présentée dans la figure III.4.

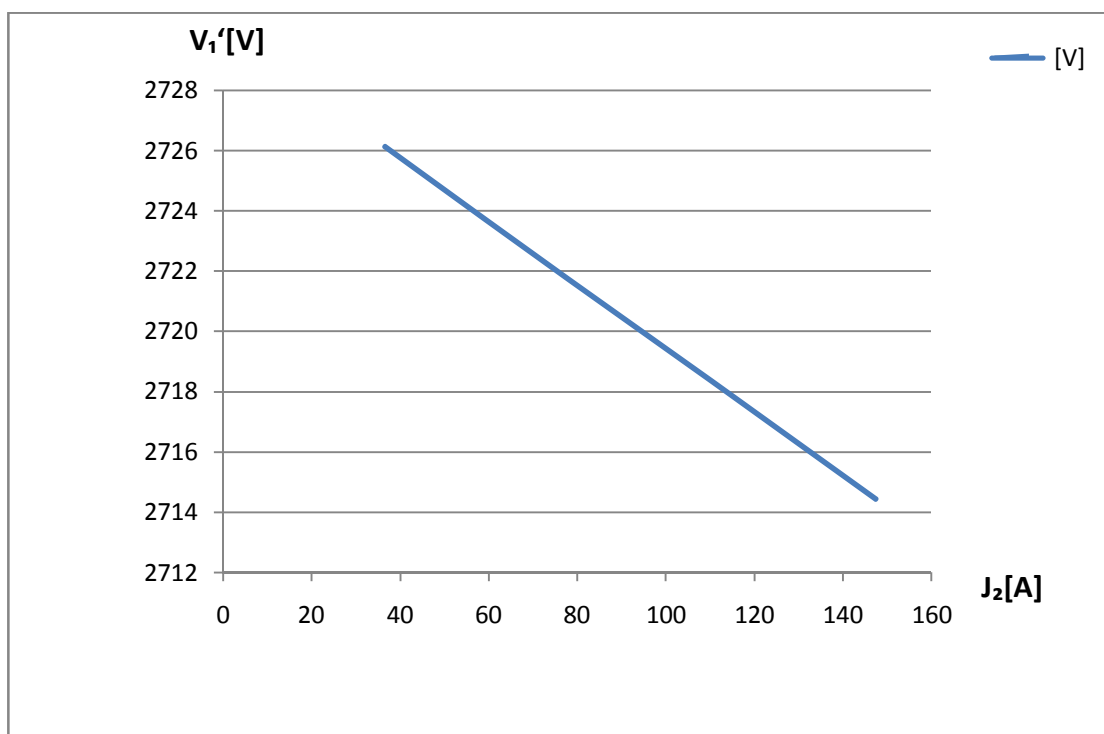


Figure III.4. La chute de tension pour une charge purement résistive

III.4.2. La chute de tension pour une charge inductive ($\cos\varphi_2 = 0,8AR$):

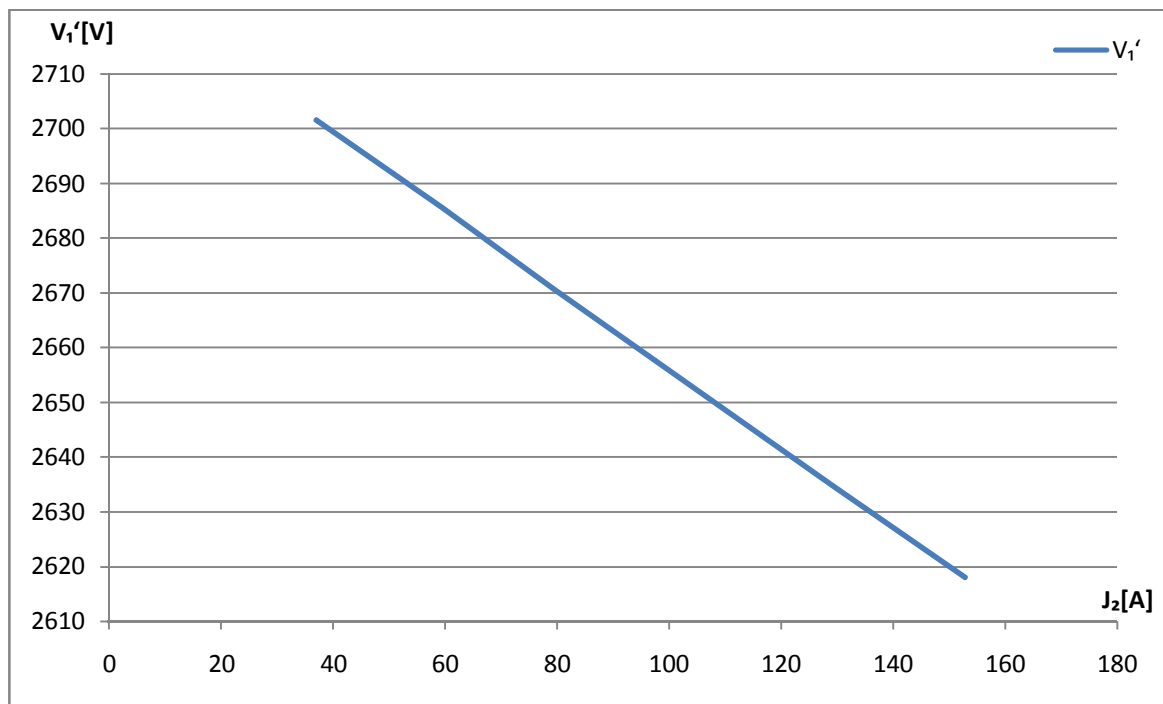
$$\triangleright \Delta U(\%) = \alpha \times (0,57 \times 0,8 + 6,07 \times 0,6)$$

$$\Delta U(\%) = \alpha \times 4,098$$

α	$\Delta U \%$	$\Delta U [V]$	$V_1' [V]$	$J_2 [A]$
0,25	1,024	27,955	2701,553	37,015
0,4	1,639	44,744	2685,553	59,578
0,53	2,171	59,268	2670,731	79,379
0,745	3,053	83,346	2646,107	113,374
1	4,098	111,875	2618,124	152,781

Tableau III .7.

La caractéristique en charge pour une charge inductive est présentée dans la figure III.5.

**Figure III.5. La chute de tension pour une charge inductive**

III.4.3. La chute de tension pour une charge capacitive ($\cos\varphi_2 = 0,8AV$):

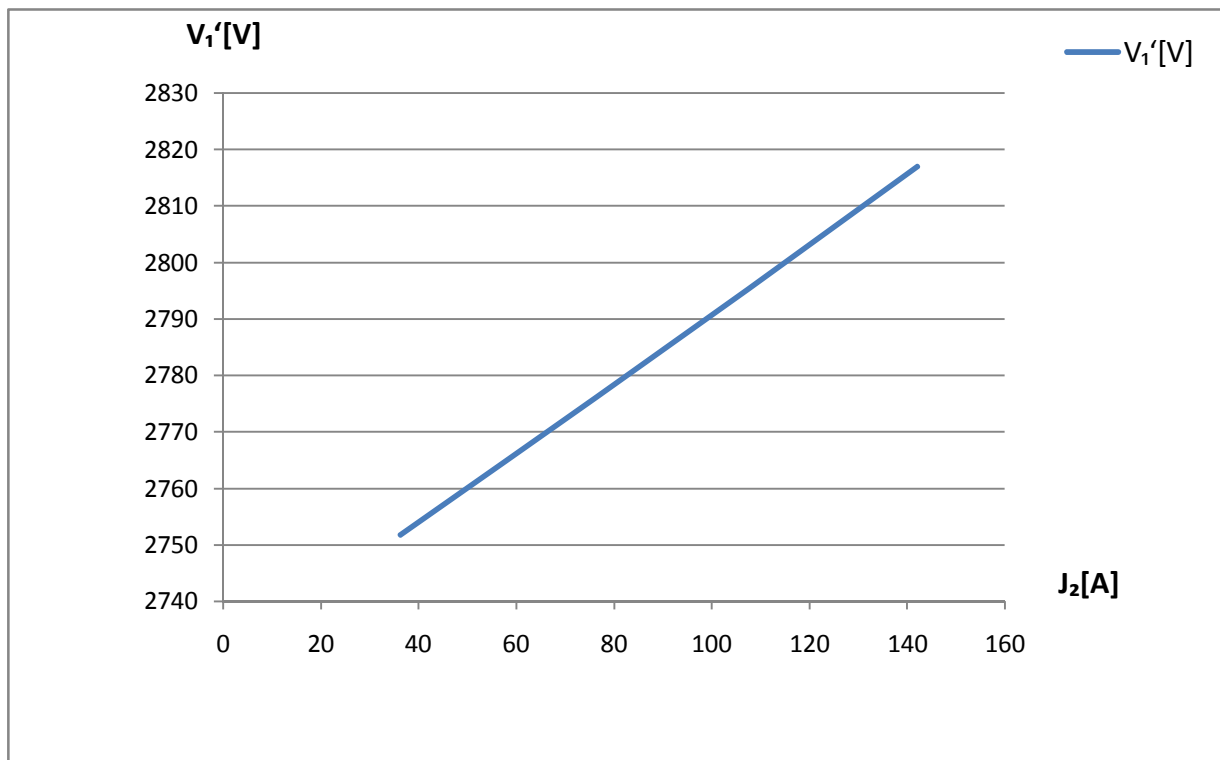
$$\triangleright \Delta U(\%) = \alpha \times (0,57 \times 0,8 - 6,07 \times 0,6)$$

$$\Delta U(\%) = -\alpha \times 3,186$$

α	$\Delta U \%$	$\Delta U [V]$	$V'_1 [V]$	$J_2 [A]$
0,25	-0,796	-21,730	2751,730	36,340
0,4	-1,274	-34,780	2764,780	57,870
0,53	-1,688	-46,082	2776,082	76,366
0,75	-2,389	-65,219	2795,219	107,326
1	-3,186	-86,977	2816,977	141,996

Tableau III .8.

La caractéristique en charge pour une charge capacitive est présentée dans la figure III.6.

**Figure III.6. Variation de la tension aux bornes une charge capacitive**

Lors de son fonctionnement, un transformateur est le siège des pertes d'énergie, dont la plus grande partie est localisée dans deux éléments principaux [7] :

- Le circuit magnétique : Elles sont causées par la variation du flux alternatif dans les tôles magnétiques.
- Dans les enroulements : Elles sont dues en grande partie à l'effet joule.

Ces pertes qui se dégagent dans le noyau et dans les enroulements sont transformées en énergie thermique et provoquent l'échauffement des parties correspondantes du transformateur.

La dispersion de l'énergie thermique sous forme de chaleur a lieu par conduction, par rayonnement et par convection [11] :

- 1) **Par conduction** : Elle concerne surtout la transmission de la chaleur à l'intérieur des corps solides (cuivre, fer, isolant).
- 2) **Par convection** : Les particules de liquide ou de gaz en contact avec un corps chaud deviennent plus légères et montent en cédant leur place à d'autres particules qui ne sont pas encore chaudes. Ces dernières à leur tour s'échauffent, montent et ainsi de suite.
- 3) **Par rayonnement** : La transmission de chaleur s'effectue par des ondes électromagnétiques.

Le type de transformateur qu'on étudie est le transformateur immergé dans l'huile ; L'isolation prévue pour les enroulements est de classe A qui est caractérisée par les températures suivantes (Tableau IV.1) :

Parties du transformateur	Température maximale [°C]
Les enroulements	65
Le circuit magnétique	75
L'huile	60

Tableau IV.1

Pour faciliter le calcul du transformateur du point de vue échauffement, on divise le parcours du flux thermique en plusieurs zones (Figure IV.1).

Les différents échauffements sont représentés sur la figure IV.2

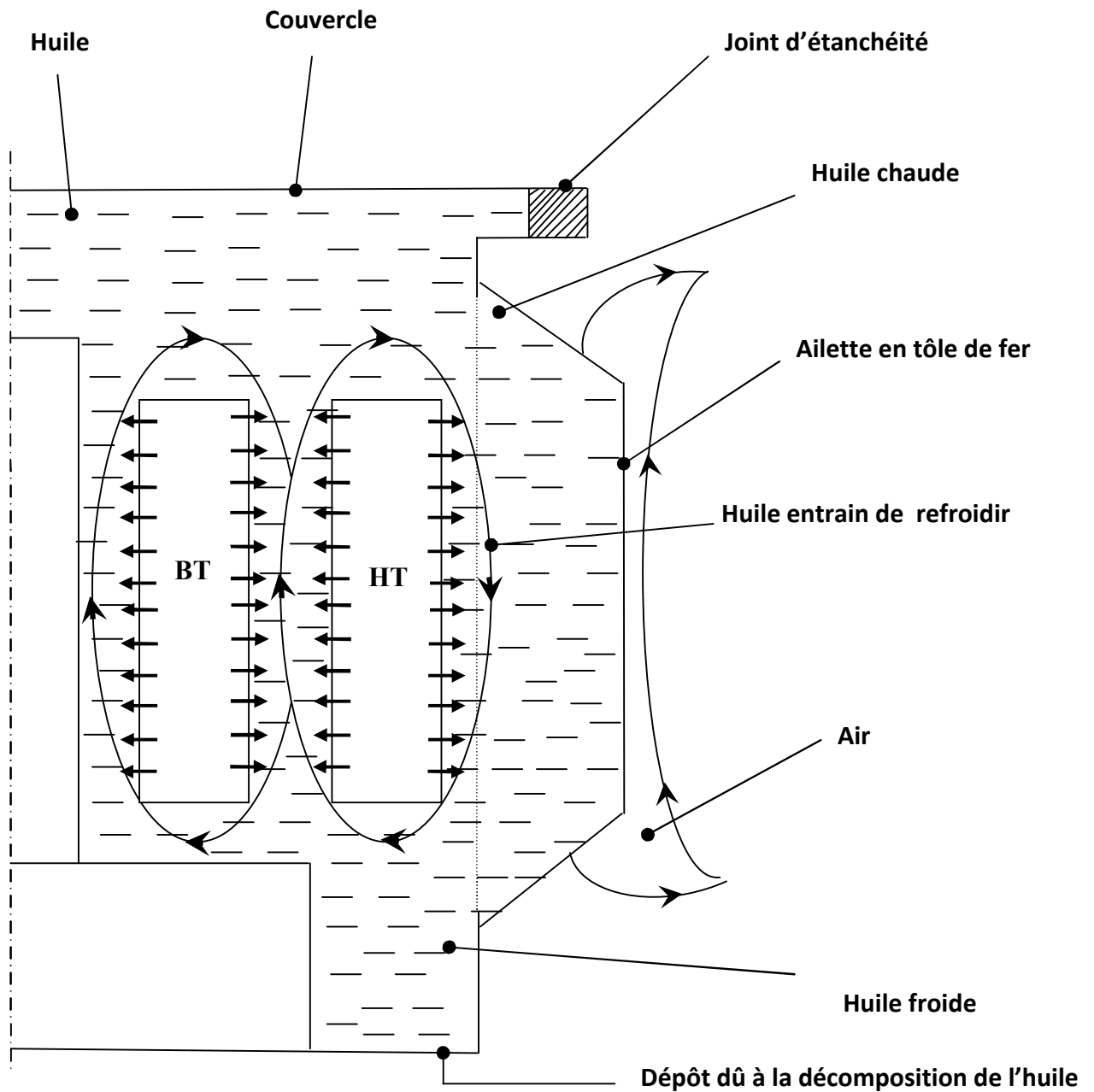
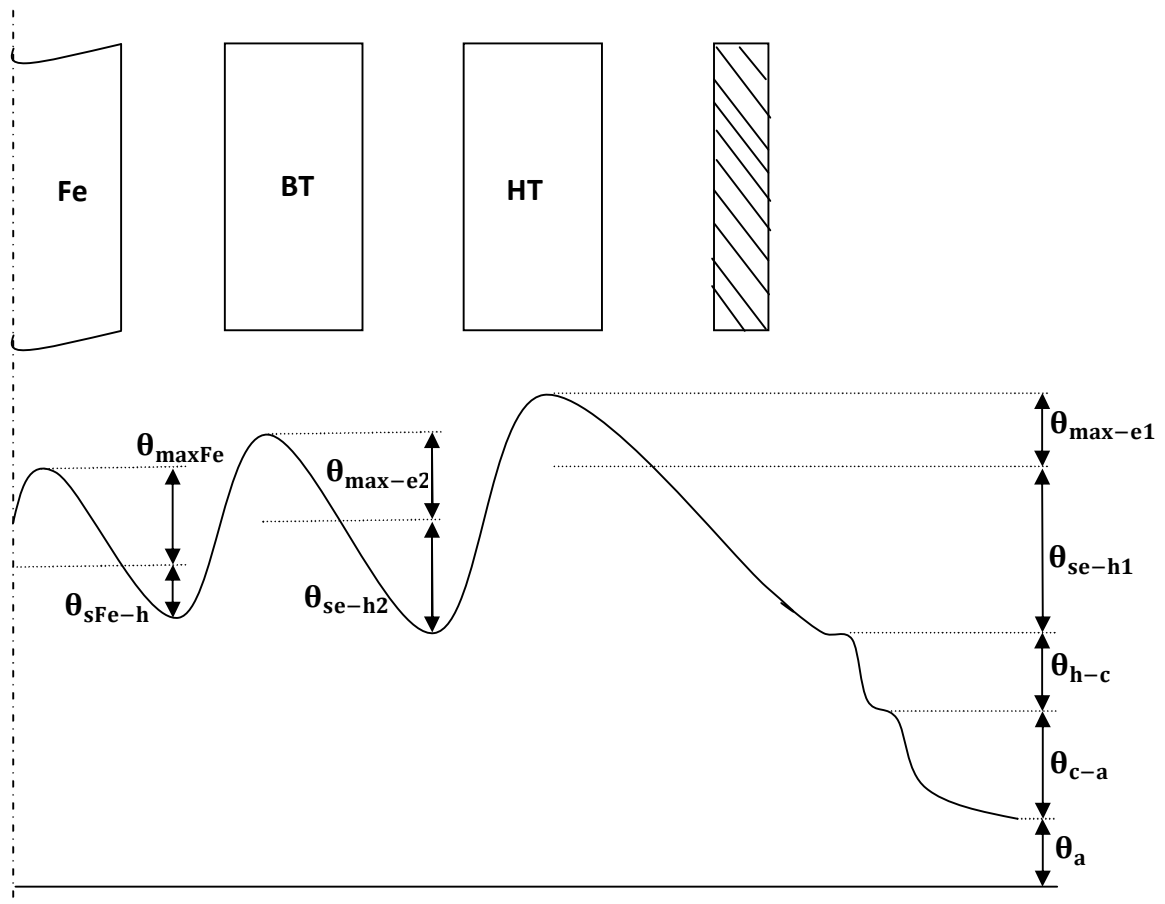


Figure IV.1 : Schéma de principe des phénomènes thermiques



θ_a : Température de l'air ambiant.

θ_{c-a} : Echauffement cuve-air.

θ_{h-c} : Echauffement huile-cuve.

θ_{se-h1} : Echauffement surface de l'enroulement primaire-huile.

θ_{max-e1} : Echauffement enroulement primaire-surface.

θ_{sFe-h} : Echauffement surface du fer-huile.

θ_{maxFe} : Echauffement maximal de la surface du fer.

θ_{se-h2} : Echauffement surface de l'enroulement secondaire-huile.

θ_{max-e2} : Echauffement enroulement secondaire-surface.

Figure IV.2 : Différents échauffements du transformateur.

IV.1. Echauffement du circuit magnétique [3, 7, 10, 11] :

La conception du circuit magnétique est complexe, pour cela on tolère qu'il soit de section rectangulaire (Figure IV.3).

On admet que les pertes sont uniformément réparties, et que le flux thermique se produit dans le sens transversal et longitudinal entre les couches des tôles du circuit magnétique.

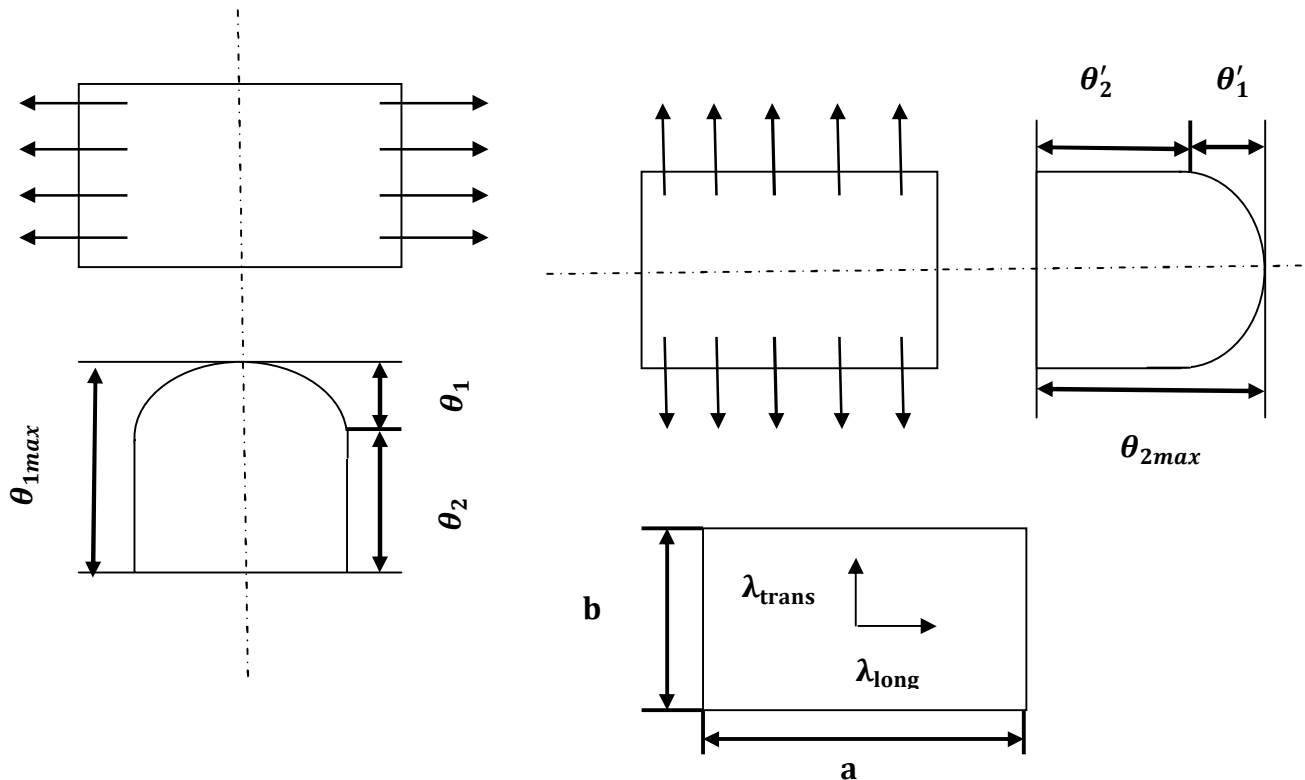


Figure IV.3 : Echauffement dans les directions transversale et longitudinale

- Les dimensions du rectangle sont :

$$\begin{cases} a = 0,9 \cdot D \text{ [mm]} & D: \text{Diametre de la colonne} \\ b = \frac{S_{\text{fer}}}{a} \text{ [mm]} & S_{\text{fer}}: \text{Section de fer de la colonne} \end{cases}$$

- Calcul de a et b :

$$a = 0,9 \times 198,4$$

$$a = 178,56 \text{ mm}$$

$$b = \frac{276 \times 10^2}{178,56}$$

$$b = 154,56 \text{ mm}$$

IV.1.1. Echauffement maximal du circuit magnétique par rapport à la surface dans les deux directions :

Pour déterminer l'échauffement maximal, on aura à calculer l'échauffement par rapport à la surface dans les directions longitudinale et transversale.

IV.1.1.a. Dans la direction longitudinale :

$$\theta_1 = \frac{P \cdot a^2}{8 \cdot \lambda_1} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (\text{IV. 1})$$

- P : Pertes spécifiques des tôles par unité de volume, elles sont définies comme suit :

$$P = P_{sp} \cdot \gamma_{fer} \left[\frac{W}{m^3} \right] \quad (\text{IV. 2})$$

- P_{sp} : Pertes spécifiques par unité de masse, elles sont définies comme suit :

$$P_{sp} = K_{Bp} \cdot \gamma_{1.5} \left[\frac{W}{Kg} \right] \quad (\text{IV. 3})$$

- λ_1 : Conductivité thermique longitudinale, elle est égale à $20 \frac{W}{m^\circ C}$

➤ Calcul de P_{sp} :

$$P_{sp} = 1,41 \times 0,97$$

$$P_{sp} = 1,36 \frac{W}{Kg}$$

➤ Calcul de P :

$$P = 1,36 \times 7,65 \times 10^3$$

$$P = 10404 \frac{W}{m^3}$$

➤ Calcul de θ_1 :

$$\theta_1 = \frac{10404 \times (178,56 \times 10^{-3})^2}{8 \times 20}$$

$$\theta_1 = 2,07 \text{ }^\circ\text{C}$$

IV.1.1.b. Dans la direction transversale :

$$\theta'_1 = \frac{P \cdot b^2}{8 \cdot \lambda_t} [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV. 4})$$

- λ_t : Conductivité thermique transversale, elle est égale à $3 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$

➤ Calcul de θ'_1 :

$$\theta'_1 = \frac{10404 \times (154,56 \times 10^{-3})^2}{8 \times 3}$$

$$\theta'_1 = 10,35 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

IV.1.2. Différence de température entre la surface du circuit magnétique et l'huile dans les deux directions :

Etant donné que le transformateur qu'on étudie est un transformateur immergé dans l'huile, il faut déterminer la différence de température entre la surface du circuit magnétique et l'huile dans les directions longitudinale et transversale.

IV.1.2.a. Dans la direction longitudinale :

$$\theta_2 = \frac{P \cdot a}{2 \cdot \alpha_{\text{con}}} [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV. 5})$$

- 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 $\alpha_{\text{con}} = 100 \text{ W/m}^2\text{ } ^{\circ}\text{C}$

➤ Calcul de θ_2 :

$$\theta_2 = \frac{10404 \times 178,56 \times 10^{-3}}{2 \times 100}$$

$$\theta_2 = 9,28 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

IV.1.2.b. Dans la direction transversale :

$$\theta'_2 = \frac{P \cdot b}{2 \cdot \alpha_{\text{con}}} [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV. 6})$$

➤ Calcul de θ'_2 :

$$\theta'_2 = \frac{10404 \times 154,56 \times 10^{-3}}{2 \times 100}$$

$$\theta'_2 = 8,04 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

❖ **L'échauffement moyen résultant du circuit magnétique :**

$$\theta_{\max \text{cm/h}} = \theta_{2\max} \cdot \frac{\theta'_2 + 1,5 \cdot \theta'_1}{\theta_{2\max} + \theta'_2 + 1,5 \cdot \theta'_1} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (\text{IV. 7})$$

$$\bullet \quad \theta_{2\max} = \theta'_1 + \theta'_2 = 10,35 + 8,04$$

$$\theta_{2\max} = 18,39 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\theta_{\max \text{cm/h}} = 18,39 \times \frac{8,04 + 1,5 \times 10,35}{18,39 + 8,04 + 1,5 \times 10,35}$$

$$\theta_{\max \text{cm/h}} = 10,32 \text{ }^\circ\text{C}$$

IV.1.3. Echauffement maximale du circuit magnétique dans les deux directions :

Après avoir calculé l'échauffement du circuit magnétique par rapport à la surface, et la différence de température entre cette dernière et l'huile, on déterminera l'échauffement maximal du circuit magnétique dans les directions longitudinale et transversale.

IV.1.3.a. Dans la direction longitudinale :

$$\theta_{1\max} = \theta_1 + \theta_2 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (\text{IV. 8})$$

➤ Calcul de $\theta_{1\max}$:

$$\theta_{1\max} = 2,07 + 9,28$$

$$\theta_{1\max} = 11,35 \text{ }^\circ\text{C}$$

IV.1.3.b. Dans la direction transversale :

$$\theta_{2\max} = \theta'_1 + \theta'_2 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (\text{IV. 9})$$

➤ Calcul de $\theta_{2\max}$:

$$\theta_{2\max} = 10,35 + 8,04$$

$$\theta_{2\max} = 18,39 \text{ }^\circ\text{C}$$

IV.2. Echauffement moyen des enroulements par rapport à l'huile [3, 7,10, 11] :

Les conditions de la répartition de la chaleur dans les enroulements sont beaucoup plus complexes que celles du circuit magnétique et dépendent de plusieurs facteurs dont les plus importants sont : le type d'enroulement, le nombre, les dimensions et l'aménagement des canaux de refroidissement et le mode de refroidissement.

La disposition utilisée pour améliorer le refroidissement de la partie active du transformateur, consiste à poser des cales entre le support et le bobinage.

La surface occupée par ces cales est estimée à 15% de la surface totale de chaque enroulement.

Avant de calculer l'échauffement des enroulements, on calculera d'abord les différentes surfaces intérieures et extérieures et les différentes surfaces de contact de l'huile avec les enroulements (figure IV. 4).

1. Surface intérieure de l'enroulement secondaire :

$$S_{i20} = \pi \cdot D_{i2} \cdot h_{B2} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (\text{IV. 10})$$

- D_{i2} et h_{B2} sont respectivement le diamètre intérieur de l'enroulement secondaire et la hauteur des enroulements primaire et secondaire.

➤ **Calcul de S_{i20} :**

$$S_{i20} = 3,14 \times 222,4 \times 494$$

$$S_{i20} = 345 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

2. Surface intérieure de l'enroulement secondaire en contact avec l'huile :

$$S_{i2-h} = 0,85 \cdot S_{i20} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (\text{IV. 11})$$

➤ **Calcul de S_{i2-h} :**

$$S_{i2-h} = 0,85 \times 345 \times 10^3$$

$$S_{i2-h} = 293 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

3. Surface extérieure de l'enroulement secondaire :

$$S_{ex20} = \pi \cdot D_{ex2} \cdot h_{B2} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (\text{IV. 12})$$

- D_{ex2} est le diamètre extérieur de l'enroulement secondaire

➤ **Calcul de S_{ex20} :**

$$S_{ex20} = 3,14 \times 290 \times 494$$

$$S_{ex20} = 450 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

4. Surface extérieure de l'enroulement secondaire en contact avec l'huile :

$$S_{ex2-h} = 0,85 \cdot S_{ex20} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (\text{IV. 13})$$

➤ **Calcul de S_{ex2-h} :**

$$S_{ex2-h} = 0,85 \times 450 \times 10^3$$

$$S_{ex2-h} = 382 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

5. Surface intérieure de l'enroulement primaire :

$$S_{i10} = \pi \cdot D_{i1} \cdot h_{B2} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (\text{IV. 14})$$

▪ D_{i1} est le diamètre intérieur de l'enroulement primaire

➤ **Calcul de S_{i10} :**

$$S_{i10} = 3,14 \times 310 \times 494$$

$$S_{i10} = 480 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

6. Surface intérieure de l'enroulement primaire en contact avec l'huile :

$$S_{i1-h} = 0,85 \cdot S_{i10} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (\text{IV. 15})$$

➤ **Calcul de S_{i1-h} :**

$$S_{i1-h} = 0,85 \times 480 \times 10^3$$

$$S_{i1-h} = 408 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

7. Surface extérieure de l'enroulement primaire :

$$S_{ex10} = \pi \cdot D_{ex1} \cdot h_{B2} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (\text{IV. 16})$$

▪ D_{ex1} est le diamètre extérieur de l'enroulement primaire

➤ **Calcul de S_{ex10} :**

$$S_{ex10} = 3,14 \times 381,6 \times 494$$

$$S_{ex10} = 592 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

8. Surface extérieure de l'enroulement primaire en contact avec l'huile :

$$S_{ex1-h} = 0,85 \cdot S_{ex10} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (\text{IV. 17})$$

➤ **Calcul de S_{ex1-h} :**

$$S_{ex1-h} = 0,85 \times 592 \times 10^3$$

$$S_{ex1-h} = 503 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

Le calcul d'échauffement des enroulements primaire et secondaire consiste à déterminer la température en différents endroits de l'enroulement (Figure VI.5).

IV.2.1. Echauffement de l'enroulement secondaire par rapport à l'huile :

IV.2.1.a. Calcul de la conductivité résultante de l'enroulement secondaire :

$$\lambda_{res} = \frac{\lambda_i \cdot L}{(2 \cdot L_i + e_{psp}) \cdot [N_c - 1]} \text{ [W/m}^\circ\text{C]} \quad (\text{IV. 18})$$

- λ_i : Conductivité du papier, elle est égale à $0,2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$.
- L : Epaisseur de l'enroulement secondaire sans isolation périphérique.
- N_c : Nombre de couches.
- $(2 \cdot L_i + e_{psp})$: Epaisseur de l'isolation du conducteur de l'enroulement secondaire

Du moment que l'enroulement Basse Tension est composée de deux enroulements monophasés, le calcul de la conductivité résultante s'appliquera pour chaque enroulement monophasé.

1) Sur la colonne A :

$$\lambda_{res1} = \frac{\lambda_i \cdot L}{(2 \cdot L_i + e_{psp}) \cdot [N_{c1} - 1]} \text{ [W/m}^\circ\text{C]}$$

➤ Calcul de L :

$$L = a_2 - 2 \cdot L_i = 33,8 - 0,5$$

$$L = 33,3 \text{ mm}$$

➤ **Calcul de λ_{res1} :**

$$\lambda_{res1} = \frac{0,2 \times 33,3 \times 10^{-3}}{(0,5 + 0,8) \times 10^{-3} \times [5 - 1]}$$

$$\lambda_{res1} = 1,28 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

2) Sur les colonnes B et C :

$$\lambda_{\text{res2}} = \frac{\lambda_i \cdot L}{(2 \cdot L_i + e_{\text{psp}}) \cdot [N_{c2} - 1]} \quad [\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}]$$

➤ Calcul de λ_{res2} :

$$\lambda_{\text{res1}} = \frac{0,2 \times 33,3 \times 10^{-3}}{(0,5 + 0,5) \times 10^{-3} \times [6 - 1]}$$

$$\lambda_{\text{res2}} = 1,33 \text{ W}/\text{m}^\circ\text{C}$$

IV.2.1.b. Calcul des résistances thermiques de l'isolation périphérique :**1) Du côté intérieure de la bobine Basse Tension :**

$$R_3 = \frac{L_i + e_{\text{psp}}}{\lambda_i \cdot S_{i2}} + \frac{1}{\alpha_{\text{con}} \cdot S_{i2}} \quad [\text{W}/^\circ\text{C}]^{-1} \quad (\text{IV. 19})$$

▪ Pour la colonne A :

$$R_{31} = \frac{(0,25 + 0,8) \times 10^{-3}}{0,2 \times 293 \times 10^3 \times 10^{-6}} + \frac{1}{100 \times 293 \times 10^3 \times 10^{-6}}$$

$$R_3 = 0,052 \quad [\text{W}/^\circ\text{C}]^{-1}$$

▪ Pour les colonnes B et C :

$$R_{32} = \frac{(0,25 + 0,5) \times 10^{-3}}{0,2 \times 293 \times 10^3 \times 10^{-6}} + \frac{1}{100 \times 293 \times 10^3 \times 10^{-6}}$$

$$R_{32} = 0,046 \quad [\text{W}/^\circ\text{C}]^{-1}$$

2) Du côté extérieur de la bobine Basse Tension :

$$R_1 = \frac{(L_i + e_{\text{psp}})}{\lambda_i \cdot S_{\text{ex2}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{con}} \cdot S_{\text{ex2}}} \quad [\text{W}/^\circ\text{C}]^{-1} \quad (\text{IV. 20})$$

▪ Pour la colonne A :

$$R_{11} = \frac{(0,25 + 0,8) \times 10^{-3}}{0,2 \times 382 \times 10^3 \times 10^{-6}} + \frac{1}{100 \times 382 \times 10^3 \times 10^{-6}}$$

$$R_{11} = 0,040 \quad [\text{W}/^\circ\text{C}]^{-1}$$

- **Pour les colonnes B et C :**

$$R_{12} = \frac{(0,25 + 0,5) \times 10^{-3}}{0,2 \times 382 \times 10^3 \times 10^{-6}} + \frac{1}{100 \times 382 \times 10^3 \times 10^{-6}}$$

$$R_{12} = 0,035 \text{ [W/}^\circ\text{C]}^{-1}$$

IV.2.1.c. Distance où la température est maximale :

D'après les courbes de la (figure IV.5), on remarque qu'elles passent par une température maximale, le point de cette température est défini comme suit :

$$X = a_2 \cdot \left[\frac{R_1 \cdot S_{\text{ex}20} + \frac{a_2}{2 \cdot \lambda_{\text{res}}}}{R_1 \cdot S_{\text{ex}20} + R_3 \cdot S_{\text{i}20} + \frac{a_2}{\lambda_{\text{res}}}} \right] \text{ [mm]} \quad (\text{IV. 21})$$

Sachant que le secondaire est composé de deux enroulements monophasés repartis sur les trois colonnes.

1) Sur la colonne A :

➤ Calcul de X_1 :

$$X_1 = 33,8 \left[\frac{0,04 \times 450 \times 10^3 + \frac{33,8}{2 \times 1,28 \times 10^{-3}}}{0,04 \times 450 \times 10^3 + 0,052 \times 345 \times 10^3 + \frac{33,8}{1,28 \times 10^{-3}}} \right]$$

$$X_1 = 16,9 \text{ mm}$$

2) Sur les colonnes B et C :

➤ Calcul de X_2 :

$$X_2 = 33,8 \left[\frac{0,035 \times 450 \times 10^3 + \frac{33,8}{2 \times 1,33 \times 10^{-3}}}{0,035 \times 450 \times 10^3 + 0,046 \times 345 \times 10^3 + \frac{33,8}{1,33 \times 10^{-3}}} \right]$$

$$X_2 = 16,9 \text{ mm}$$

Donc : $X_1 \approx X_2 = X$

D'où :

$$(a_2 - X) = 33,8 - 16,9$$

$$(a_2 - X) = 16,9 \text{ mm}$$

IV.2.1.d. Calcul des flux thermiques P_1 et P_3 :

P_1 : Le flux thermique traversant S_{ex2}

P_3 : Le flux thermique traversant S_{i2}

On a :

$$P_{cc2} = 3. (P_1 + P_3) [W] \quad (IV. 22)$$

Et :

$$k = \frac{P_1}{P_3} = \frac{(a_2 - X). S_{ex20}}{X. S_{i20}} \quad (IV. 23)$$

$$k = \frac{16,9 \times 450 \times 10^3}{16,9 \times 345 \times 10^3}$$

$$\mathbf{k = 1,3}$$

➤ **Calcul de P_1 :**

$$P_1 = \frac{P_{cc2}}{3. \left(1 + \frac{1}{k}\right)} [W] \quad (IV. 24)$$

$$P_1 = \frac{2448}{3 \times \left(1 + \frac{1}{1,3}\right)}$$

$$\mathbf{P_1 = 461,2 \text{ W}}$$

➤ **Calcul de P_3 :**

$$P_3 = \frac{P_{cc2}}{3. (1 + k)} [W] \quad (IV. 25)$$

$$P_3 = \frac{2448}{3 \times (1 + 1,3)}$$

$$\mathbf{P_3 = 354,8 \text{ W}}$$

IV.2.1.e. Calcul des résistances internes :

$$R_{in1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(a_2 - X)}{\lambda_{res} \cdot S_{ex20}} [W/^\circ C]^{-1} \quad (IV. 26)$$

1) Pour la colonne A :

$$R_{in11} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(a_2 - X)}{\lambda_{res1} \cdot S_{ex20}} = \frac{1}{2} \times \frac{16,9 \times 10^{-3}}{1,28 \times 450 \times 10^3 \times 10^{-6}}$$

$$R_{in11} = 0,014 [\text{W}/^\circ\text{C}]^{-1}$$

2) Pour les colonnes B et C :

$$R_{in12} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(a_2 - X)}{\lambda_{res2} \cdot S_{ex20}} = \frac{1}{2} \times \frac{16,9 \times 10^{-3}}{1,33 \times 450 \times 10^3 \times 10^{-6}}$$

$$R_{in12} = 0,014 [\text{W}/^\circ\text{C}]^{-1}$$

$$R_{in11} = R_{in12} = R_{in1} = 0,014 [\text{W}/^\circ\text{C}]^{-1}$$

$$R_{in3} = \frac{1}{2} \cdot \frac{X}{\lambda_{res} \cdot S_{i20}} [\text{W}/^\circ\text{C}]^{-1} \quad (\text{IV. 27})$$

1) Pour la colonne A :

$$R_{in31} = \frac{1}{2} \cdot \frac{X}{\lambda_{res1} \cdot S_{i20}} = \frac{1}{2} \times \frac{16,9 \times 10^{-3}}{1,28 \times 345 \times 10^3 \times 10^{-6}}$$

$$R_{in31} = 0,019 [\text{W}/^\circ\text{C}]^{-1}$$

2) Pour les colonnes B et C :

$$R_{in32} = \frac{1}{2} \cdot \frac{X}{\lambda_{res2} \cdot S_{i20}} = \frac{1}{2} \times \frac{16,9 \times 10^{-3}}{1,33 \times 345 \times 10^3 \times 10^{-6}}$$

$$R_{in32} = 0,018 [\text{W}/^\circ\text{C}]^{-1}$$

$$R_{in31} \approx R_{in32} = R_{in3} = 0,019 [\text{W}/^\circ\text{C}]^{-1}$$

IV.2.1.f. Calcul de la température maximale de l'enroulement :**1) A l'extérieure de la bobine :**

$$\theta_m = P_1 \cdot (R_1 + R_{in1}) [^\circ\text{C}] \quad (\text{IV. 28})$$

▪ **Pour la colonne A :**

$$\theta_{m1} = 461,2 \times (0,040 + 0,014)$$

$$\theta_{m1} = 24,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

▪ **Pour les colonnes B et C :**

$$\theta_{m2} = 461,2 \times (0,035 + 0,014)$$

$$\theta_{m2} = 22,59 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2) A l'intérieure de la bobine :

$$\theta'_m = P_3 \cdot (R_3 + R_{in3}) [^\circ\text{C}] \quad (\text{IV. 29})$$

▪ **Pour la colonne A :**

$$\theta'_{m1} = 354,8 \times (0,052 + 0,019)$$

$$\theta'_{m1} = 25,19 \text{ } ^\circ\text{C}$$

▪ **Pour les colonnes B et C :**

$$\theta'_{m2} = 354,8 \times (0,046 + 0,019)$$

$$\theta'_{m2} = 23,06 \text{ } ^\circ\text{C}$$

D'où

$$\theta_{max} = 25,19 \text{ } ^\circ\text{C}$$

IV.2.1.g. Calcul des températures superficielles de l'enroulement :

$$\theta_1 = P_1 \cdot R_{in1} [^\circ\text{C}] \quad (\text{IV. 30})$$

$$\theta_1 = 461,2 \times 0,014$$

$$\theta_1 = 6,45 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_3 = P_3 \cdot R_{in3} [^\circ\text{C}] \quad (\text{IV. 31})$$

$$\theta_3 = 354,8 \times 0,019$$

$$\theta_3 = 6,74 \text{ } ^\circ\text{C}$$

IV.3.1.h. Calcul de la température moyenne de l'enroulement Basse Tension par rapport à l'huile :

$$\theta_{2moy/h} = \theta_{max} - \frac{k \cdot \theta_1 + \theta_3}{3 \cdot (k + 1)} [^{\circ}C] \quad (IV.32)$$

$$\theta_{moy2/h} = 25,19 - \frac{1,3 \times 6,45 + 6,74}{3 \times (1,3 + 1)}$$

$$\theta_{moy2/h} = 23 \text{ } ^{\circ}C$$

IV.2.2. Echauffement de l'enroulement primaire par rapport à l'huile :

IV.2.2.a. Calcul de la conductivité résultante de l'enroulement Haute Tension :

$$\lambda_{res} = \frac{\lambda_v \cdot L}{2 \cdot L_i \cdot [N_c - 1]} [W/m^{\circ}C] \quad (IV.33)$$

- λ_v : Conductivité thermique du vernis, elle est égale à $0,17 \text{ W/m}^{\circ}C$.
- L : Epaisseur de l'enroulement primaire sans isolation périphérique.
- N_c : Nombre de couches.
- $2 \cdot L_i$: Epaisseur de l'isolation du conducteur de l'enroulement primaire

➤ Calcul de L :

$$L = a_1 - 2 \cdot L_i = 35,8 - 0,26$$

$$L = 35,54 \text{ mm}$$

➤ Calcul de λ_{res} :

$$\lambda_{res1} = \frac{0,17 \times 35,54 \times 10^{-3}}{0,26 \times 10^{-3} \times [13 - 1]}$$

$$\lambda_{res} = 1,93 \text{ W/m}^{\circ}C$$

IV.2.2.b. Calcul des résistances thermiques de l'isolation périphérique :**1) Du côté intérieure de la bobine Haute Tension :**

$$R_3 = \frac{L_i}{\lambda_v \cdot S_{i1-h}} + \frac{1}{\alpha_{con} \cdot S_{i1-h}} [W/^\circ C]^{-1} \quad (IV. 34)$$

$$R_3 = \frac{0,13 \times 10^{-3}}{0,17 \times 408 \times 10^3 \times 10^{-6}} + \frac{1}{100 \times 408 \times 10^3 \times 10^{-6}}$$

$$R_3 = 0,026 [W/^\circ C]^{-1}$$

2) Du côté extérieur de la bobine Haute Tension :

$$R_1 = \frac{L_i}{\lambda_v \cdot S_{ex1-h}} + \frac{1}{\alpha_{con} \cdot S_{ex1-h}} [W/^\circ C]^{-1} \quad (IV. 35)$$

$$R_1 = \frac{0,13 \times 10^{-3}}{0,17 \times 503 \times 10^3 \times 10^{-6}} + \frac{1}{100 \times 503 \times 10^3 \times 10^{-6}}$$

$$R_1 = 0,021 [W/^\circ C]^{-1}$$

IV.2.2.c. Distance où la température est maximale :

D'après les courbes de la (figure IV.5), on remarque qu'elles passent par une température maximale, cette température est définit comme suit :

$$X = L \cdot \left[\frac{R_1 \cdot S_{ex10} + \frac{L}{2 \cdot \lambda_{res}}}{R_1 \cdot S_{ex10} + R_3 \cdot S_{i10} + \frac{L}{\lambda_{res}}} \right] [mm] \quad (IV. 36)$$

$$X = 35,54 \left[\frac{0,021 \times 592 \times 10^3 + \frac{35,54}{2 \times 1,93 \times 10^{-3}}}{0,021 \times 592 \times 10^3 + 0,026 \times 480 \times 10^3 + \frac{35,54}{1,93 \times 10^{-3}}} \right]$$

$$X = 17,75 \text{ mm}$$

D'où :

$$(L - X) = 35,54 - 17,75$$

$$(L - X) = 17,79 \text{ mm}$$

IV.2.2.d. Calcul des flux thermiques P_1 et P_3 :

P_1 : Le flux thermique traversant S_{ex1-h}

P_3 : Le flux thermique traversant S_{i1-h}

On a :

$$P_{cc1} = 3 \cdot (P_1 + P_3) [W] \quad (IV.37)$$

Et :

$$k = \frac{P_1}{P_3} = \frac{(L - X) \cdot S_{ex10}}{X \cdot S_{i10}} \quad (IV.38)$$

$$k = \frac{17,79 \times 592 \times 10^3}{17,75 \times 480 \times 10^3}$$

$$k = 1,2$$

➤ Calcul de P_1 :

$$P_1 = \frac{P_{cc1}}{3 \cdot \left(1 + \frac{1}{k}\right)} [W] \quad (IV.39)$$

$$P_1 = \frac{2173}{3 \times \left(1 + \frac{1}{1,2}\right)}$$

$$P_1 = 395,09 \text{ W}$$

➤ Calcul de P_3 :

$$P_3 = \frac{P_{cc1}}{3 \cdot (1 + k)} [W] \quad (IV.40)$$

$$P_3 = \frac{2173}{3 \times (1 + 1,2)}$$

$$P_3 = 329,24 \text{ W}$$

IV.2.2.e. Calcul des résistances internes :

▪ Résistance interne R_{in1} :

$$R_{in1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(L - X)}{\lambda_{res} \cdot S_{ex10}} [W/^\circ C]^{-1} \quad (IV.41)$$

$$R_{in1} = \frac{1}{2} \times \frac{17,79 \times 10^{-3}}{1,93 \times 592 \times 10^3 \times 10^{-6}}$$

$$R_{in1} = 0,0077 [W/^\circ C]^{-1}$$

▪ **Résistance interne R_{in3} :**

$$R_{in3} = \frac{1}{2} \cdot \frac{X}{\lambda_{res} \cdot S_{i10}} [\text{W}/^{\circ}\text{C}]^{-1} \quad (\text{IV. 42})$$

$$R_{in3} = \frac{1}{2} \times \frac{17,75 \times 10^{-3}}{1,93 \times 480 \times 10^3 \times 10^{-6}}$$

$$R_{in3} = 0,0095 [\text{W}/^{\circ}\text{C}]^{-1}$$

IV.2.2.f. Calcul de la température maximale de l'enroulement Haute Tension:

1) A l'extérieure de la bobine :

$$\theta_m = P_1 \cdot (R_1 + R_{in1}) [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV. 43})$$

$$\theta_m = 395,09 \times (0,021 + 0,0077)$$

$$\theta_m = 11,33 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

2) A l'intérieure de la bobine :

$$\theta'_m = P_3 \cdot (R_3 + R_{in3}) [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV. 44})$$

$$\theta'_m = 329,24 \times (0,026 + 0,0095)$$

$$\theta'_m = 11,68 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

Donc : $\theta_{\max} = 11,68 \text{ } ^{\circ}\text{C}$

IV.2.2.g. Calcul des températures superficielles de l'enroulement :

$$\theta_1 = P_1 \cdot R_{in1} [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV. 45})$$

$$\theta_1 = 395,09 \times 0,0077$$

$$\theta_1 = 3,04 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

$$\theta_3 = P_3 \cdot R_{in3} [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV. 46})$$

$$\theta_3 = 329,24 \times 0,0095$$

$$\theta_3 = 3,12 \text{ } ^{\circ}$$

IV.2.2.h. Calcul de la température moyenne de l'enroulement Haute Tension par rapport à l'huile :

$$\theta_{1\text{moy}/h} = \theta_m - \frac{k \cdot \theta_1 + \theta_3}{3 \cdot (k + 1)} [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV. 47})$$

$$\theta_{\text{moy}1/h} = 11,68 - \frac{1,2 \times 3,04 + 3,12}{3 \times (1,2 + 1)}$$

$$\theta_{\text{moy}1/h} = 10,65 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

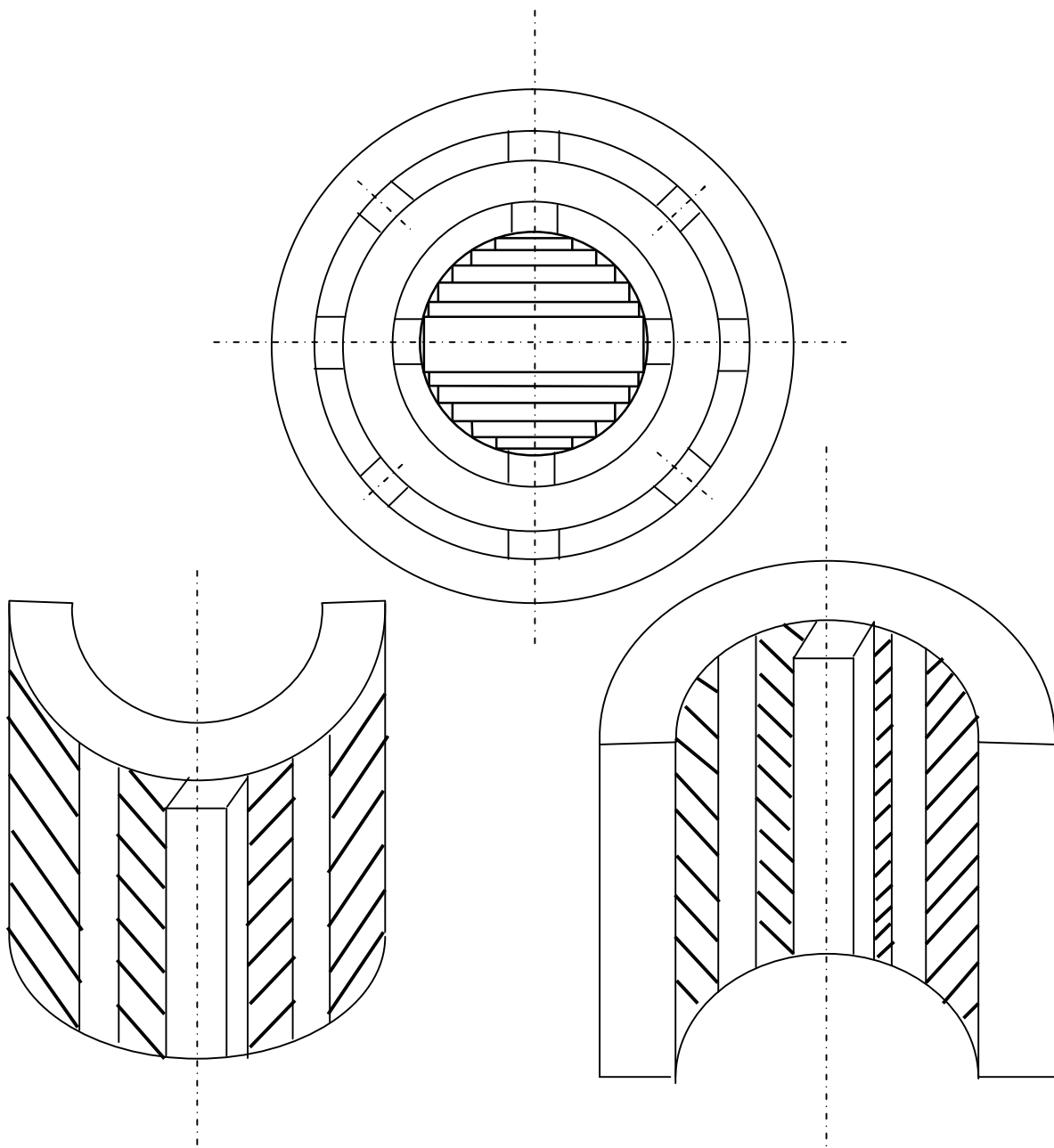


Figure IV.4 : Les surfaces des enroulements.

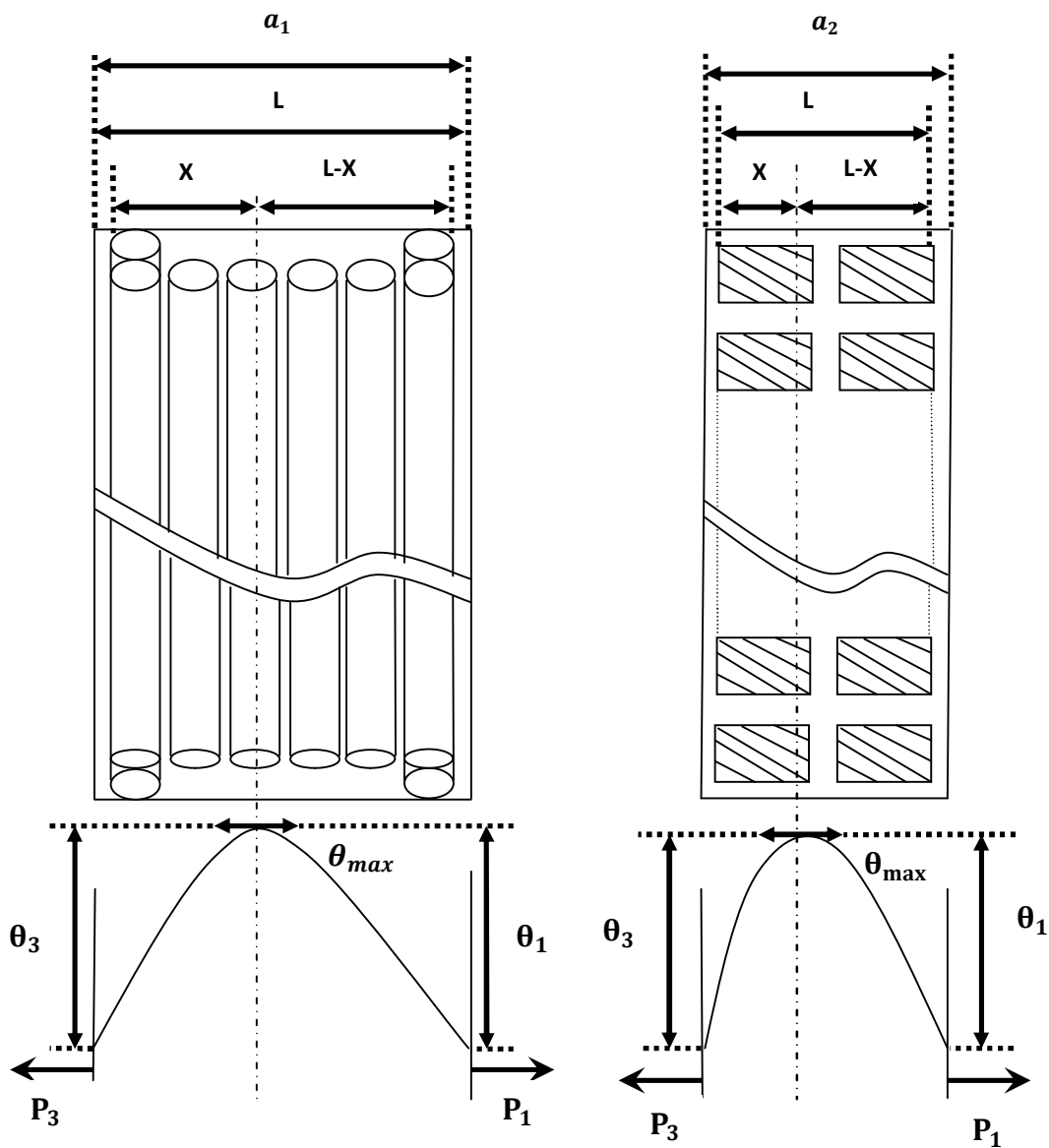


Figure IV.5 : Echauffement moyen
des enroulements et leurs configurations géométriques

IV.3. Echauffement de l'huile [3,7,11,10,11] :

IV.3.1. Dimensionnement de la cuve :

Toute la chaleur qui se dégage du noyau et des enroulements est évacuée par convection d'huile par l'intermédiaire de la surface extérieure de la cuve vers l'air.

La cuve à une section de forme rectangulaire avec des parois en tôles ondulées, afin de permettre le refroidissement de l'huile.

IV.3.1.a. Longueur intérieure de la cuve :

La longueur intérieure de la cuve est assimilée à la longueur des tôles de serrage et de la distance d'isolement, sa formule est comme suit :

$$L_w = L_{ts} + L_{iso} [\text{mm}] \quad (\text{IV. 48})$$

- L_{ts} : Longueur de tôles de serrage, elle est définie comme suit :

$L_{ts} = 3 \cdot E_c + 2 \cdot D_{lt}$; Où D_{lt} est la distance entre le boulon de serrage et l'extrémité de la tôle de serrage, $D_{lt} = 20 \text{ mm}$

- L_{iso} : Distance d'isolation, $L_{iso} = 10 \text{ mm}$.

➤ Calcul de L_w :

$$L_w = 3 \times 395,4 + 2 \times 20 + 10$$

$$L_w = 1236,2 \text{ mm}$$

IV.3.1.b. Largeur intérieure de la cuve :

$$l_w = D_{ex1} + 2 \times 20 [\text{mm}] \quad (\text{IV. 49})$$

- 20 mm : Distance d'isolation pour la série 10 kV.

$$l_w = 381,6 + 2 \times 20$$

$$l_w = 421,6 \text{ mm}$$

IV.3.1.c. Hauteur de la cuve :

Elle est définie comme suit :

$$H_v = H_T + H_n + F_{s-co} + e [\text{mm}] \quad (\text{IV. 50})$$

- H_T : Hauteur des tôles d'embases, $H_T = 30 \text{ mm}$
- F_{s-co} : Distance entre la tige de serrage et le couvercle, $F_{s-co} = 191 \text{ mm}$ pour les transformateurs de 10 kV.
- e : Epaisseur du papier entre les tôles d'embases et le noyau, $e = 2 \text{ mm}$

➤ **Calcul de H_v :**

$$H_v = 30 + 974 + 191 + 2$$

$$H_v = 1197 \text{ mm}$$

IV.3.1.d. Choix des dimensions des ondulations :

On note :

- B_w : Hauteur de l'ondulation.
- T_w : Profondeur de l'ondulation.

Il faut que l'ondulation dépasse la bobine vers le bas ; d'après le tableau IV.1, on prend

$B_w = 900 \text{ mm}$.Et on choisit une profondeur d'ondulation de 250 mm

$B_w[\text{mm}]$	$T_w[\text{mm}]$	50	100	125	160	200	250	280	320
500	$P_w[\text{w}]$	34	51	59	69	80	93	—	—
	$G_w[\text{Kg}]$	0.71	1.20	1.45	1.79	2.18	2.69	—	—
	$V_w[\text{dm}^3]$	0.19	0.39	0.49	0.63	0.79	1.00	—	—
600	$P_w[\text{w}]$	40	59	68	79	92	108	116	127
	$G_w[\text{Kg}]$	0.84	1.43	1.73	2.14	2.61	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	$P_w[\text{w}]$	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	1.56	1.79
800	$P_w[\text{w}]$	50	74	85	99	115	134	145	159
	$G_w[\text{Kg}]$	1.11	1.90	2.29	2.84	3.47	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	2.04
900	$P_w[\text{w}]$	55	81	93	109	126	147	159	174
	$G_w[\text{Kg}]$	1.24	2.13	2.57	3.19	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	$P_w[\text{w}]$	60	88	101	118	137	160	172	189
	$G_w[\text{Kg}]$	1.38	2.36	2.85	3.45	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

Tableau IV.1

IV.3.1.e. Détermination du nombre d'ondulations (figure IV.6) :

Le nombre d'ondulations est exprimé par la formule suivante :

$$N_w = \frac{P_{55w}}{P_w} \quad (\text{IV. 51})$$

P_w : Les pertes dissipées par ondulation, elles sont données par le tableau IV.1.

$$P_w = 147 \text{ W}$$

P_{55w} : Les pertes à dissiper.

$$P_{55w} = m[(P_{cc} \cdot 1.06) + P_0] \text{ [w]} \quad (\text{IV. 52})$$

m : Facteur de correction de température ; Il est donné par la formule suivante :

$$m = \left(\frac{55}{T} \right)^{\frac{1}{0.7}} \quad (\text{IV. 53})$$

T : Température maximal de l'huile ; elle est donnée par la formule suivante :

$$T = (\Delta\theta_{cu} - \theta_{m/h}) \cdot 1,2 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV. 54})$$

$\Delta\theta_{cu}$: Élévation moyenne de la température du cuivre ; elle est exprimée par la formule suivante :

$$\Delta\theta_{cu} = \Delta\theta_{cu \text{ max}} - T_a \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV. 55})$$

$\Delta\theta_{cu \text{ max}} = 105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ C'est la température maximale de cuivre.

$T_a = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Température ambiante.

$\theta_{m/h}$: Température moyenne de l'enroulement secondaire par rapport à l'huile, car c'est la température la plus élevée.

$$\theta_{m/h} = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

➤ **Calcul de $\Delta\theta_{cu}$:**

$$\Delta\theta_{cu} = 105 - 50$$

$$\Delta\theta_{cu} = 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

➤ **Calcul de T :**

$$T = (55 - 23) \times 1,2$$

$$T = 38,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

➤ **Calcul de m :**

$$m = \left(\frac{55}{38.4} \right)^{\frac{1}{0.7}}$$

$$m = 1.67$$

➤ **Calcul de P_{55w} :**

$$P_{55w} = 1.67[(4621 \times 1.06) + 1333.9]$$

$$P_{55w} = 10407.7 \text{ W}$$

➤ **Calcul de N_w :**

$$N_w = \frac{10407.7}{147}$$

$$N_w \approx 70 \text{ Ondulations}$$

On prend $N_w = 70$ ondulations pour respecter les valeurs de e_{w1} et e_{w2} (figure IV.5) limitées par la construction entre 18 mm à 65 mm ; on prend :

$$\begin{cases} n_L = 52 \text{ ondulations suivant la longueur} \\ n_l = 18 \text{ ondulations suivant la largeur} \end{cases}$$

La longueur intérieure et la largeur de la cuve sont exprimées respectivement comme suit :

$$L_w = 2 \cdot e_{w1} + [n'_L - 1] \cdot e_x$$

$$l_w = 2 \cdot e_{w2} + [n'_l - 1] \cdot e_x$$

- $n'_L = \frac{n_L}{2} = 26$ ondulations : nombre d'ondulations d'une façade pour une longueur de la cuve.
- $n'_l = \frac{n_l}{2} = 9$ ondulations : nombre d'ondulations d'une façade pour une largeur de la cuve.
- $e_x = 45$ mm : Distance entre axe d'ondulation

Donc :

$$e_{w1} = \frac{L_w - [n'_L - 1] \cdot e_x}{2} = \frac{1236,2 - [26 - 1] \times 45}{2}$$

$$e_{w1} = 55,6 \text{ mm}$$

$$e_{w2} = \frac{l_w - [n'_l - 1] \cdot e_x}{2} = \frac{421,6 - [9 - 1] \times 45}{2}$$

$$e_{w2} = 30,8 \text{ mm}$$

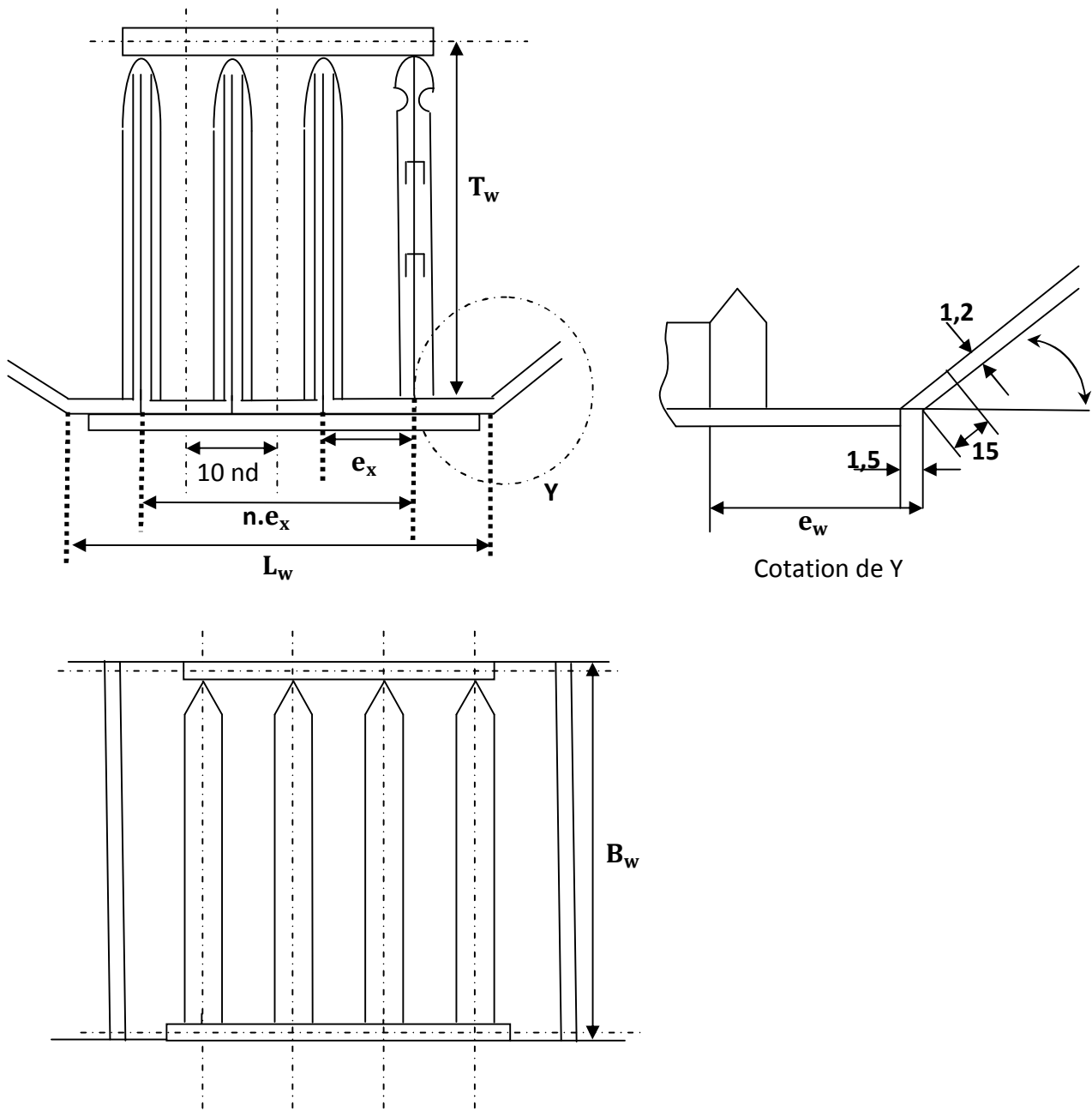


Figure IV.6. Caractéristique des ondulations

IV.3.2. Pertes dissipées par la cuve :

Pour les calculer on se réfère à une température fixée à 55 °C . Les pertes dissipées dans la cuve sont définies comme suite :

$$P_{55} = (D_{55w} + D_{55C}).f [W] \quad (IV. 56)$$

- D_{55C} : Pertes dissipées par le couvercle ; elles sont données par la formule suivante :

$$D_{55C} = \delta. (L_w + 2. B_p). (l_w + 2. B_p) [W] \quad (IV. 57)$$

- $\delta = 700 \text{ W/m}^2$: Pertes dissipées par rm^2 .
- B_p : Distance du bord de la cuve, la valeur de $(2. B_p)$ est donnée par le tableau IV.2.

$S_n [kVA]$	≤ 250	315–1600
$2. B_p [m]$	0,09	0,13

Tableau IV.2

Pour $S_n = 800 \text{ kVA}$; on à $2. B_p = 0,13 \text{ m}$

- Calcul de D_{55C} :

$$D_{55C} = 700 \times (1236,2 \times 10^{-3} + 0,13) \times (421,6 \times 10^{-3} + 0,13)$$

$$\mathbf{D_{55C} = 527,5 \text{ W}}$$

- D_{55w} : Pertes dissipées par les ondulations ; Elles sont données par la formule suivante :

$$D_{55w} = 2. (n'_L. P_{w1} + n'_I. P_{w2}) + 22,4. B_w. (e_{w1} + e_{w2}). 10^2 + 8,6. B_w (T_{w1} + T_{w2} - K). 10^2 \quad (IV. 58)$$

- $P_{w1} = P_{w2} = P_w = 147 \text{ W}$.
- $T_{w1} = T_{w2} = T_w = 250 \text{ mm}$
- $K = 0,1$: Facteur expérimentale.

- Calcul de D_{55w} :

$$D_{55w} = 2 \times 147 \times (26 + 9) + 22,4 \times 900 \times 10^{-3} \times (55,6 + 30,8) \times 10^{-3} \times 10^2 + 8,6 \times 900 \times 10^{-3} \times (2 \times 250 \times 10^{-3} - 0,1) \times 10^2$$

$$\mathbf{D_{55w} = 10773,7 \text{ W}}$$

- $f = 1,07$: Facteur correcteur

➤ Calcul de P_{55} :

$$P_{55} = (10773,7 + 527,5) \times 1,07$$

$$P_{55} = 12092,2 \text{ W}$$

○ Correction de m :

$$m = \frac{P_{55}}{P_{55w}} = \frac{12092,2}{10407,7}$$

$$m = 1,16$$

IV.3.3. Calcul de la surélévation maximale de la température d'huile :

$$\theta_{mh} = \frac{55}{m^{0,72}} = \frac{55}{1,16^{0,72}}$$

$$\theta_{mh} = 49,42 \text{ °C}$$

IV.3.4. La surélévation moyenne de la température d'huile:

$$\theta_{moyh} = \frac{\theta_{mh}}{1,2} = \frac{49,42}{1,2}$$

$$\theta_{moyh} = 41,18 \text{ °C}$$

IV.3.5. Echauffement de l'huile par rapport à la cuve :

$$\theta_{h/c} = 0,165 \cdot \frac{[1,05 \cdot (P_0 + P_{cc})]^{0,6}}{S_c} \text{ [°C]} \quad (\text{IV. 59})$$

▪ S_c : Surface en contact de l'huile ; elle est définie comme suit :

$$S_c = S_0 + S_w [\text{dm}^2] \quad (\text{IV. 60})$$

• S_0 : Surface du couvercle ; elle a pour valeur :

$$S_0 = L_w \cdot l_w = 1236,2 \times 421,6$$

$$S_0 = 52,11 \text{ dm}^2$$

• S_w : Surface totale de la partie ondulée ; elle est définie comme suit :

$S_w = S_{w1} + S_{w2}$: Où S_{w1}, S_{w2} sont respectivement les surfaces du côté long et large du transformateur.

$$S_{w1} = 2 \cdot [2 \cdot n_L \cdot (T_w - r) \cdot B_w] + 2n_L \cdot \pi \cdot r \cdot B_w + (e_x - d) \cdot B_w \cdot (n_L - 1) + 4 \cdot \left(e_{w1} - \frac{d}{2}\right) \cdot B_w \quad (\text{IV. 61})$$

$$S_{w2} = 2 \cdot [2 \cdot n_l \cdot (T_w - r) \cdot B_w] + 2n_l \cdot \pi \cdot r \cdot B_w + (e_x - d) \cdot B_w \cdot (n_l - 1) + 4 \cdot \left(e_{w2} - \frac{d}{2}\right) \cdot B_w \quad (\text{IV. 62})$$

❖ $r = 4 \text{ mm}$: Rayon de courbure de l'ondulation

❖ $d = 8 \text{ mm}$: Diamètre de l'ondulation

$$S_{w1} = 2 \times [2 \times 26 \times (250 - 4) \times 900] + 2 \times 26 \times \pi \times 4 \times 900 + (45 - 8) \times 900 \times (26 - 1) + 4 \times \left(55,6 - \frac{4}{2}\right) \times 900$$

$$S_{w1} = 2463,8 \text{ dm}^2$$

$$S_{w2} = 2 \times [2 \times 9 \times (250 - 4) \times 900] + 2 \times 9 \times \pi \times 4 \times 900 + (45 - 8) \times 900 \times (9 - 1) + 4 \times \left(30,8 - \frac{4}{2}\right) \times 900$$

$$S_{w2} = 854,4 \text{ dm}^2$$

➤ Calcul de S_w :

$$S_w = 2463,8 + 854,4$$

$$S_w = 3318,2 \text{ dm}^2$$

➤ Calcul de S_c :

$$S_c = 52,11 + 3318,2$$

$$S_c = 3370,3 \text{ dm}^2$$

➤ Calcul de $\theta_{h/c}$:

$$\theta_{h/c} = 0,165 \times \frac{[1,05 \times (1333,9 + 4621)]^{0,6}}{3370,3 \times 10^{-2}}$$

$$\theta_{h/c} = 0,92 \text{ } ^\circ\text{C}$$

IV.4. Echauffement de la cuve par rapport à l'air :

L'échauffement de la cuve par rapport à l'air est donné par la relation suivante :

$$\theta_{c/a} = \frac{[1,05 \cdot (P_0 + P_{cc})]^{0,8}}{2,8 \cdot S_r + 2,5 \cdot S_c} \text{ } [^\circ\text{C}] \quad (\text{IV. 63})$$

- S_r : Surface radiante de la cuve ; elle est définie comme étant la somme de la surface enveloppante de la cuve et de la surface du couvercle.

$$S_r = [(L_w + 2 \cdot T_w) + (l_w + 2 \cdot T_w)] \cdot B_w + S_0 \text{ [dm}^2\text{]} \quad (\text{IV. 64})$$

➤ **Calcul de S_r :**

$$S_r = [(1236,2 + 2 \times 250) \times 10^{-2} + (421,6 + 2 \times 250) \times 10^{-2}] \times 900 \times 10^{-2} + 52,11$$

$$S_r = 291,3 \text{ dm}^2$$

➤ **Calcul de $\theta_{h/a}$:**

$$\theta_{c/a} = \frac{[1,05 \times (1333,9 + 4621)]^{0,8}}{2,8 \times 291,3 \times 10^{-2} + 2,5 \times 3370,3 \times 10^{-2}}$$

$$\theta_{c/a} = 11,77 \text{ }^\circ\text{C}$$

IV.5. Température moyenne du circuit magnétique :

$$T_{cm} = \theta_{mcm/h} + \theta_{h/c} + \theta_{c/a} + T_a = 10,32 + 0,92 + 11,77 + 50$$

$$T_{cm} = 73,01 \text{ }^\circ\text{C}$$

IV.6. Températures moyennes finales des enroulements :

1) Enroulement primaire :

$$T_{c1} = \theta_{m1/h} + \theta_{h/c} + \theta_{c/a} + T_a = 10,65 + 0,92 + 11,77 + 50$$

$$T_{c1} = 73,34 \text{ }^\circ\text{C}$$

2) Enroulement secondaire :

$$T_{c2} = \theta_{m2/h} + \theta_{h/c} + \theta_{h/a} + T_a = 23 + 0,92 + 11,77 + 50$$

$$T_{c2} = 85,69 \text{ }^\circ\text{C}$$

* T_{c1} Et T_{c2} sont inférieures à la température admissible de l'enroulement $\theta_{ad} = 115 \text{ }^\circ\text{C}$, ce qui est conforme à la classe d'isolation du matériau choisi (classe A).

De ce fait, la partie active de notre transformateur peut résister aux échauffements maximaux.

La surintensité de court-circuit peut atteindre cinquante fois le courant nominal, cela entraîne des efforts électrodynamiques importants entre enroulements, efforts qui s'élèvent à des centaines de tonnes dans les très gros transformateurs [6].

Le but de ce chapitre est de vérifier la résistance des bobinages aux efforts électrodynamiques dus aux courants de court-circuit, et le dimensionnement des différents éléments de serrage (ferrures, boulons....etc.).

V.1. Calcul du courant maximal de court-circuit [3, 10] :

V.1.1. Pour l'enroulement Haute Tension :

Il est donné par la relation suivante :

$$I_{cc \max 1} = \sqrt{2} \cdot K_m \cdot I_{cc1} \quad [A] \quad (V.1)$$

K_m : Coefficient de crête ou d'impulsion ; son expression est donnée par :

$$K_m = 1 + e^{-\pi \left(\frac{U_{cca}}{U_{ccr}} \right)} \quad (V.2)$$

I_{cc1} : Courant stationnaire de court-circuit ; il est donné par :

$$I_{cc1} = I_{n1} \cdot \frac{100}{U_{cc}} \quad [A] \quad (V.3)$$

➤ Calcul de K_m :

$$K_m = 1 + e^{-\pi \left(\frac{0.57}{6.07} \right)}$$

$$K_m = 1.74$$

➤ Calcul de I_{cc1} :

$$I_{cc1} = 26.7 \times \frac{100}{6.09}$$

$$I_{cc1} = 438.42 \text{ A}$$

➤ Calcul de $I_{cc \max 1}$:

$$I_{cc \max 1} = \sqrt{2} \times 1.74 \times 438.42$$

$$I_{cc \max 1} = 1078.8 \text{ A}$$

V.1.2. Pour l'enroulement Basse Tension :

Il est donné par la relation suivante :

$$I_{cc \max 2} = \sqrt{2} \cdot K_m \cdot I_{cc2} \quad [A] \quad (V.4)$$

$$I_{cc2} = I_{n2} \cdot \frac{100}{U_{cc}} \quad [A] \quad (V.5)$$

➤ **Calcul de I_{cc2} :**

$$I_{cc2} = 97.8 \times \frac{100}{6.09}$$

$$I_{cc2} = 1605.9 \text{ A}$$

➤ **Calcul de I_{ccmax2} :**

$$I_{cc \max 2} = \sqrt{2} \times 1.74 \times 1605.9$$

$$I_{cc \max 2} = 3951.6 \text{ A}$$

V.2. Calcul des efforts électrodynamiques [3, 6, 7, 10]:

Les spires des enroulements primaire et secondaire d'un transformateur se présentent sur tout leur parcours comme des conducteurs parallèles. Il en résulte simultanément une attraction entre les spires d'un même enroulement, puisque les courants y sont de même sens, et une répulsion entre les enroulements primaire et secondaire.

On distingue deux efforts, radiaux et axiaux (figure V. 1).

V.2.1. Calcul des efforts radiaux :

Les forces radiales exercent une compression sur la basse tension et une traction sur la haute tension ; elles sont données par les expressions suivantes :

▪ **Dans l'enroulement Haute Tension :**

$$F_{r1} = \frac{6.4 \cdot (n \cdot I_{ccmax1})^2 \cdot L_{m1} \cdot K_R \cdot 10^{-8}}{h_{b1}} \quad [kgf] \quad (V.6)$$

$$F_{r1} = \frac{6.4 \times (971 \times 1078.8)^2 \times 1086 \times 0.97 \times 10^{-8}}{494}$$

$$F_{r1} = 149752.78 \text{ kgf}$$

▪ **Dans l'enroulement Basse Tension :**

1) **Pour la bobine de la colonne A:**

$$F_{r21} = \frac{6.4 \cdot ((n_1 - x) \cdot I_{ccmax2})^2 \cdot L_{m2} \cdot K_R \cdot 10^{-8}}{h_{b2}} \quad [kgf] \quad (V.7)$$

$$F_{r21} = \frac{6.4 \times (177 \times 3951.6)^2 \times 804.4 \times 0.97 \times 10^{-8}}{494}$$

$$F_{r21} = 49452.62 \text{ kgf}$$

2) Pour les colonnes B et C:

$$F_{r22} = \frac{6.4 \cdot ((n_2 + x) \cdot I_{ccmax2})^2 \cdot L_{m2} \cdot K_R \cdot 10^{-8}}{h_{b2}} \quad [\text{kgf}] \quad (\text{V.8})$$

$$F_{r22} = \frac{6.4 \times (241 \times 3951.6)^2 \times 804.4 \times 0.97 \times 10^{-8}}{494}$$

$$F_{r22} = 91680.47 \text{ kgf}$$

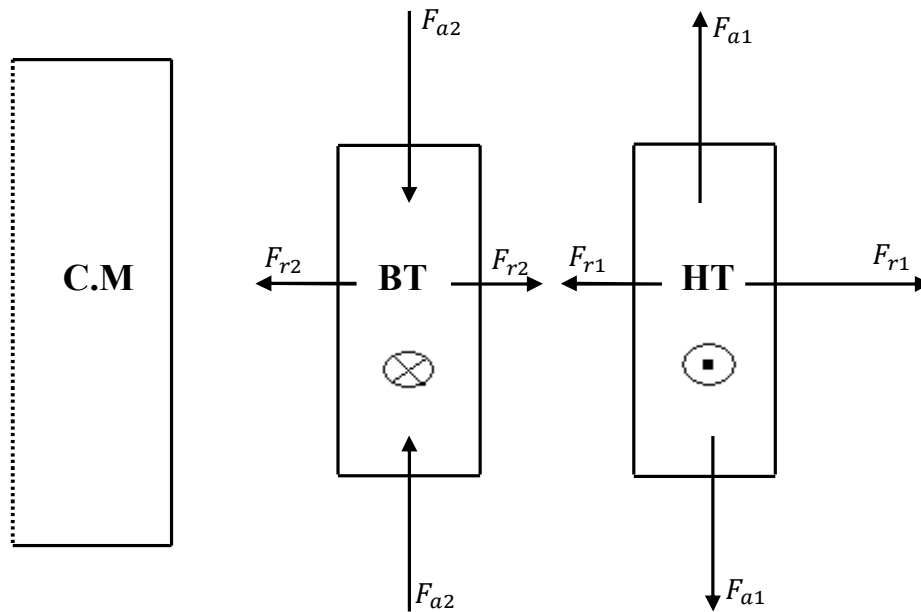


Figure V.1. Efforts électrodynamiques exercés sur les enroulements.

V.2.2. Calcul des efforts axiaux :

Ils sont donnés par les relations suivantes :

▪ Dans l'enroulement Haute Tension :

$$F_{a1} = F_{r1} \cdot \frac{a_r}{2 \cdot h_{b1}} \quad [\text{kgf}] \quad (\text{V. 9})$$

$$F_{a1} = 149752.78 \times \frac{33.2}{2 \times 494}$$

$$F_{a1} = 5032.17 \text{ kgf}$$

▪ Dans l'enroulement Basse Tension :

1) Pour la bobine de la colonne A:

$$F_{a21} = F_{r21} \cdot \frac{a_r}{2 \cdot h_{b2}} \quad [\text{kgf}] \quad (\text{V. 10})$$

$$F_{a21} = 49452.62 \times \frac{33.2}{2 \times 494}$$

$$F_{a21} = 1661.76 \text{ kgf}$$

2) Pour les colonnes B et C:

$$F_{a22} = F_{r22} \cdot \frac{a_r}{2 \cdot h_{b2}} \quad [\text{kgf}] \quad (\text{V. 11})$$

$$F_{a22} = 91680.47 \times \frac{33.2}{2 \times 494}$$

$$F_{a22} = 3080.76 \text{ kgf}$$

V.2.3. Calcul des efforts unitaires radiaux :

▪ Dans l'enroulement Haute Tension :

$$\delta_{r1} = \frac{F_{r1}}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot S_{n1}} \quad [\text{kgf/cm}^2] \quad (\text{V. 12})$$

$$\delta_{r1} = \frac{149752.78}{2 \times 3.14 \times 971 \times 6.16 \times 10^{-2}}$$

$$\delta_{r1} = 398.67 \text{ kgf/cm}^2$$

▪ Dans l'enroulement Basse Tension :

1) Pour la bobine de la colonne A:

$$\delta_{r21} = \frac{F_{r21}}{2 \cdot \pi \cdot (n_1 - x) \cdot S_{n2}} \quad [\text{kgf/cm}^2] \quad (\text{V.13})$$

$$\delta_{r21} = \frac{49452.62}{2 \times 3.14 \times 177 \times 43.8 \times 10^{-2}}$$

$$\delta_{r21} = 101.57 \text{ kgf/cm}^2$$

2) Pour les colonnes B et C:

$$\delta_{r22} = \frac{F_{r22}}{2 \cdot \pi \cdot (n_2 + x) \cdot S_{n2}} \quad [\text{kgf/cm}^2] \quad (\text{V.14})$$

$$\delta_{r22} = \frac{91680.47}{2 \times 3.14 \times 241 \times 43.8 \times 10^{-2}}$$

$$\delta_{r22} = 138.30 \text{ kgf/cm}^2$$

V.2.4. Calcul des efforts unitaires axiaux :

▪ Dans l'enroulement Haute Tension :

$$\delta_{a1} = \frac{F_{a1}}{\pi \cdot D_{moy1} \cdot a_1} \quad [\text{kgf/cm}^2] \quad (\text{V.15})$$

$$\delta_{a1} = \frac{5032.17}{3.14 \times 345.8 \times 35.8 \times 10^{-2}}$$

$$\delta_{a1} = 12.94 \text{ kgf/cm}^2$$

▪ Dans l'enroulement Basse Tension :

1) Pour la bobine de la colonne A:

$$\delta_{a21} = \frac{F_{a21}}{\pi \cdot D_{moy2} \cdot a_2} \quad [\text{kgf/cm}^2] \quad (\text{V.16})$$

$$\delta_{a21} = \frac{1661.76}{3.14 \times 256.2 \times 38.8 \times 10^{-2}}$$

$$\delta_{a21} = 5.32 \text{ kgf/cm}^2$$

2) Pour les colonnes B et C:

$$\delta_{a22} = \frac{F_{a22}}{\pi \cdot D_{moy2} \cdot a_2} \quad [\text{kgf/cm}^2] \quad (V.17)$$

$$\delta_{a22} = \frac{3080.76}{3.14 \times 256.2 \times 38.8 \times 10^{-2}}$$

$$\delta_{a22} = 9.87 \text{ kgf/cm}^2$$

- ❖ En se référant à la condition sur les efforts unitaires axiaux et radiaux auxquels sont soumis les enroulements Haute et Basse tension, qui ne doivent pas dépasser l'effort admissible de cuivre (700 kgf/cm^2), les enroulements auront une bonne tenue aux efforts électrodynamiques de court-circuit.

V.3. Calcul mécanique des parties constructives [3,6, 9, 10] :

Les noyaux munis de leurs bobines, l'assemblage du circuit magnétique se fait par serrage entre deux ferrures F_1, F_2 réunis par des tiges T, lesquels sont terminés par des écrous E (figure V.2).

Les ferrures doivent être choisies de façon à résister aux pressions développées par les boulons de serrage. Le serrage doit être parfait pour éviter les variations et réduire ainsi le bruit du transformateur.

La force totale exercée sur les tôles est donnée par la relation suivante :

$$F = P \cdot B_{S6} \cdot L_n \quad [\text{kgf}] \quad (V.18)$$

- P : Pression entre la culasse et les ferrures de serrage par unité de surface considérée uniformément répartie. Sa valeur est comprise entre 2 et 6 kgf/cm^2 , et on choisit $P = 4 \text{ kgf/cm}^2$.

$$F = 4 \times 55 \times 980.8 \times 10^{-2}$$

$$F = 2158 \text{ kgf}$$

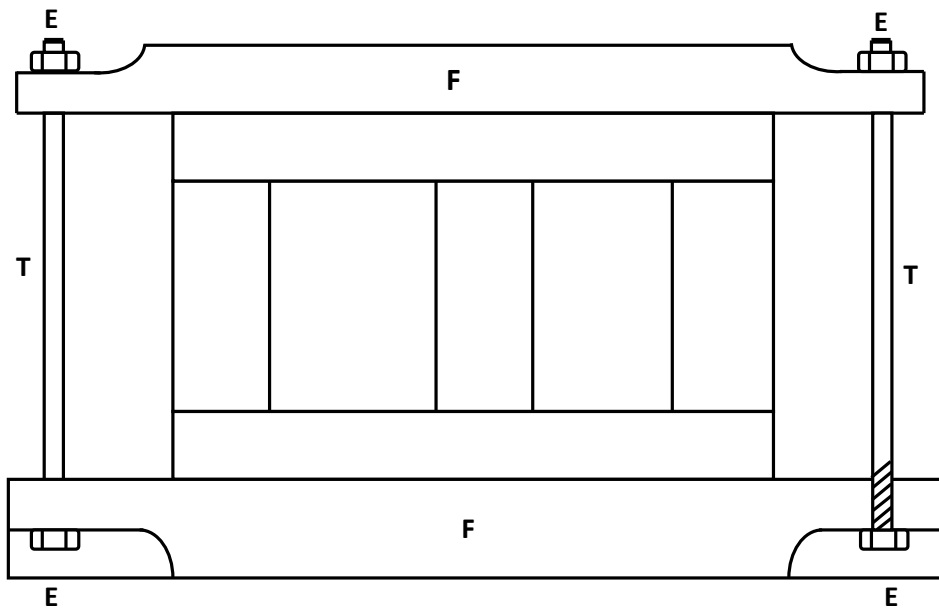


Figure V.2. Assemblage du circuit magnétique

V.3.1. Calcul du moment maximal supporté par la ferrure de serrage :

$$M_{max} = \frac{P \cdot B_{S6} \cdot E_B^2}{8} \quad [kgf.cm] \quad (V.19)$$

- E_B : Distance entre les axes des tiges de serrage, on prend $E_B = 200 \text{ mm}$

$$M_{max} = \frac{4 \times 55 \times 200^2 \times 10^{-3}}{8}$$

$$M_{max} = 1100 \text{ kgf.cm}$$

V.3.2. Calcul du module de résistance de la ferrure de serrage :

$$M_y = \frac{M_{max}}{\sigma_a} \quad [cm^3] \quad (V.20)$$

σ_a : Charge unitaire admissible pour l'acier de la ferrure, sa valeur est de 1200 kgf/cm^2

$$M_y = \frac{1100}{1200}$$

$$M_y = 0.91 \text{ cm}^3$$

V.3.3. Boulons de serrage :

Chaque tige qui assure le serrage des ferrures est soumise à un effort de traction du à la réaction de ferrures de serrage. Les tiges (boulons) utilisées sont de nuance A_{48} , dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Resistance à la rupture de 4800 kg.f/cm^2 .
- Contrainte admissible de traction de 1200 kg.f/cm^2 .

Les forces de réaction des tôles serrées et le poids de la partie décuvable exercent sur les boulons des contraintes R_1 et R_2 (figure V.3) qui sont respectivement la force de traction des boulons d'extrémités, et la force de traction des boulons traversant la culasse. Ces contraintes sont données par les formules suivantes :

$$R_1 = \frac{3}{16} \cdot F \quad [\text{kg.f}] \quad (\text{V. 21})$$

$$R_2 = \frac{5}{16} \cdot F \quad [\text{kg.f}] \quad (\text{V. 22})$$

$$R_1 = \frac{3}{16} \times 2158$$

$$R_1 = 404,62 \text{ kg.f}$$

$$R_2 = \frac{5}{16} \times 2158$$

$$R_2 = 674,37 \text{ kg.f}$$

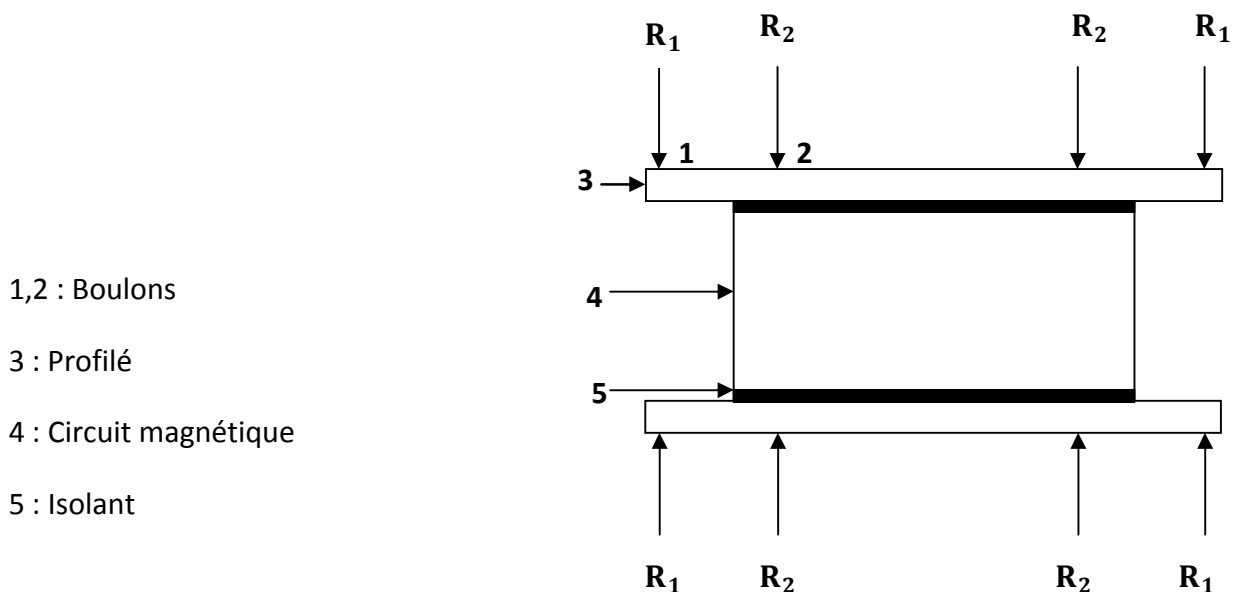


Figure V.3. Modèle de calcul des forces de réaction des tôles.

V.3.4. Dimensionnement des boulons :

Il consiste à calculer le diamètre des boulons, en considérant la force de traction la plus importante et que les efforts qui s'y produisent doivent être plus petits que les efforts unitaires. Pour cela on vérifie la condition suivante :

$$\sigma_t = \frac{R_2}{S} \leq \sigma_{tr} \text{ [kg.f/cm]} \quad (V.23)$$

- σ_t : Contrainte de traction.
- $\sigma_{tr} = 1000 \text{ kg.f/cm}$: Contrainte de traction de rupture.

Le diamètre des boulons de serrage sera donné par la formule suivante :

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot R_2}{\pi \cdot \sigma_{tr}}} \text{ [cm]} \quad (V.24)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \times 674,37}{\pi \times 1000}}$$

$$d \approx 1 \text{ cm}$$

V.3.5. Tirants de serrage :

La partie décuvable est suspendue au couvercle par des tirants qui relient les ferrures supérieures aux ferrures inférieures.

Le diamètre des tirants est donné en fonction du moment de serrage. On le choisit d'après le tableau V.1.

$$M_t = \frac{3}{4} \cdot (\sum F_n) \cdot C \times 10^{-2} \text{ [kg.f.m]} \quad (V.25)$$

- $\sum F_n$: Force de pressage par spire ; elle est donnée par la formule suivante :

- Dans la bobine de la colonne A:

$$\sum F_n = 2 \cdot \frac{1,4 \cdot F_{r21}}{(n_1 - X)} \cdot \text{[kg.f]} \quad (V.26)$$

$$\sum F_n = 2 \times \frac{1,4 \times 49452,62}{177}$$

$$\sum F_n = 782,3 \text{ kgf}$$

- Dans la bobine des colonnes B, C:

$$\sum F_n = 2 \cdot \frac{1,4 \cdot F_{r22}}{n_2 + X} \cdot [\text{kgf}] \quad (\text{V.27})$$

$$\sum F_n = 2 \times \frac{1,4 \times 91680,47}{241}$$

$$\sum F_n = 1065,16 \text{ kgf}$$

- C : Facteur clé ; on prend $C = 0,31 \text{ cm}$

- Calcul de M_t :

- Dans la bobine de la colonne A:

$$M_{t1} = \frac{3}{4} \times 782,3 \times 0,31 \times 10^{-2}$$

$$M_{t1} = 1,81 \text{ kgf.m}$$

- Dans la bobine des colonnes B, C:

$$M_{t2} = \frac{3}{4} \times 1065,16 \times 0,31 \times 10^{-2}$$

$$M_{t2} = 2,47 \text{ kgf.m}$$

- ❖ Le diamètre du tirant est donné par le tableau V.1.

$S_n [\text{kVA}]$	Nombre de tirants	Diamètre du tirant $D [\text{mm}]$	Facteur $C [\text{cm}]$	Moment max $[\text{kgf.m}]$
≤ 125	4	12	0.22	5.4
$160 \div 315$	8	12	0.22	5.4
$400 \div 630$	8	16	0.26	12
$800 \div 1600$	8	20	0.31	22

Tableau V.1

Pour une puissance de 800 kVA , le diamètre correspondant est $D = 20 \text{ mm}$.

V.4. Calcul du volume de la partie décuvable :

C'est le volume occupé par la partie active et les accessoires de fixations, serrage et isolateurs à l'intérieur de la cuve, il est donné par la formule suivante :

$$V_d = \left(\frac{G_n}{\gamma_{fer}} + \frac{G_c}{\gamma_{cu}} \right) \cdot \alpha \text{ [dm}^3\text{]} \quad (V.28)$$

Le volume occupé par les accessoires de fixation et de serrage à l'intérieure de la cuve est estimé à 20 % du volume de la partie active.

- $\alpha = 1,2$: Facteur de correction pour tenir compte des différentes parties qui rentrent en considération (papier, pièce métallique,...)

$$V_d = \left(\frac{788,7}{7,65} + \frac{372,95}{8,9} \right) \times 1,2$$

$$V_d = 174 \text{ dm}^3$$

V.5. Calcul du volume de la cuve sans ondulations :

$$V_{cso} = L_w \cdot l_w \cdot H_v \text{ [dm}^3\text{]} \quad (V.29)$$

$$V_{cso} = 1236,2 \times 421,6 \times 1197 \times 10^{-6}$$

$$V_{cso} = 623,85 \text{ dm}^3$$

V.6. Calcul du volume des ondulations :

$$V_{od} = N_w \cdot V_w \text{ [dm}^3\text{]} \quad (V.30)$$

- V_w : Volume d'ondulation, il est tiré du tableau V.1, $V_w = 1,79 \text{ dm}^3$

$$V_{od} = 70 \times 1,79$$

$$V_{od} = 125,3 \text{ dm}^3$$

V.7. Calcul du volume total de la cuve :

$$V_{tc} = V_{cso} + V_{od} \text{ [dm}^3\text{]} \quad (V.31)$$

$$V_{tc} = 623.85 + 125.3$$

$$V_{tc} = 749.15 \text{ dm}^3$$

V.8. Calcul du volume de l'huile dans la cuve :

$$V_h = V_{cso} + V_{od} - V_d \text{ [dm}^3\text{]} \quad (V.32)$$

$$V_h = 623,85 + 125,3 - 174$$

$$V_h = 575,15 \text{ dm}^3$$

V.9. Calcul du volume de l'huile total :

En plus de la présence de l'huile dans la cuve, on la trouve aussi dans le conservateur de l'huile ; le volume total de l'huile est donné par la formule suivante :

$$V_{ht} = V_h + 5\%V_h \text{ [dm}^3\text{]} \quad (V.33)$$

▪ $5\%V_h$: Volume de l'huile contenu dans le conservateur de l'huile, se volume varie de 5% à 10% du volume de l'huile dans la cuve.

$$V_{ht} = 575,15 + 0,05 \times 575,15$$

$$V_{ht} = 603,9 \text{ dm}^3$$

V.10. Calcul du poids total du transformateur :

Le poids total du transformateur est la somme du poids de la cuve, de la partie décuvable et de l'huile.

$$G_T = G_{cv} + G_d + G_h \text{ [kg]} \quad (V.34)$$

V.10.1. Calcul du poids de la cuve :

$$G_{cv} = G_w + G_0 \text{ [kg]} \quad (V.35)$$

▪ G_w : Poids de la partie ondulée ; il est calculé comme suit :

$$G_w = \gamma_{fer} \cdot S_w \cdot e_w \text{ [kg]} \quad (V.36)$$

▪ $e_w = 1,2 \text{ mm}$: Epaisseur de la tôle des ondulations.

▪ G_0 : Poids du couvercle, il est calculé comme suit :

$$G_0 = \gamma_{fer} \cdot S_0 \cdot e_b \text{ [kg]} \quad (V.37)$$

- $e_b = 6 \text{ mm}$: Epaisseur de la tôle du bassin, du couvercle et du côté arrière du transformateur.

➤ Calcul de G_w :

$$G_w = 7,65 \times 3318,2 \times 1,2 \times 10^{-2}$$

$$\mathbf{G_w = 304,61 \text{ kg}}$$

➤ Calcul de G_0 :

$$G_0 = 7,65 \times 52,11 \times 6 \times 10^{-2}$$

$$\mathbf{G_0 = 23,91 \text{ kg}}$$

➤ Calcul de G_{cv} :

$$G_{cv} = 304,61 + 23,91$$

$$\mathbf{G_{cv} = 328,52 \text{ kg}}$$

V.10.2. Calcul du poids de la partie décuvable :

C'est le poids de la partie active et les accessoires de serrages et d'isolations ; le poids de ces accessoires est estimé à 10% du poids de la partie active.

$$G_d = (G_n + G_c) + 10\% \cdot (G_n + G_c) \text{ [kg]} \quad (\text{V. 38})$$

$$G_d = (788,7 + 372,95) + 0,1 \times (788,7 + 372,95)$$

$$\mathbf{G_d = 1277,8 \text{ kg}}$$

V.11. Calcul du poids de l'huile :

$$G_h = \gamma_h \cdot V_h \text{ [kg]} \quad (\text{V. 39})$$

- $\gamma_h = 0,86 \text{ kg/dm}^3$: Masse volumique de l'huile utilisé.

$$G_h = 0,86 \times 575,15$$

$$\mathbf{G_h = 494,62 \text{ kg}}$$

Calcul de G_T :

$$G_T = 320,55 + 1277,8 + 494,62$$

$$\mathbf{G_T = 2092,97 \text{ kg}}$$

Après avoir déterminé toutes les dimensions du transformateur dans les chapitres précédents, c'est l'étape de sa fabrication qui suit.

Tout transformateur doit pouvoir obligatoirement subir en fin de fabrication des essais.

VI.1. Construction :[3, 9]

VI.1.1. Partie active :

VI.1.1.a. Circuit magnétique :

Le circuit magnétique est en tôles de 0,35 mm ou de 0,5 mm d'épaisseur.

Les tôles utilisées à l'ELECTRO-INDUSTRIE pour le circuit magnétique sont livrées sous forme de rouleaux de 800 mm de largeur, et de 0,3 mm d'épaisseur. Elles sont revêtues d'une couche de carlite afin d'éviter tout incident pouvant endommager leurs formes et diminuer leurs propriétés magnétiques.

Le découpage des tôles à 45 ° pour réduire les pertes dans les coins, se fait automatiquement à l'aide d'une découpeuse qu'on règle selon les dimensions voulues et la forme adoptée au circuit magnétique.

Le circuit magnétique est formé de trois colonnes réunies par deux culasses par enchevêtrement.

Une fois qu'on a vérifié que les tôles découpées ne présentent aucune éraflure sur leurs surfaces, on passe à leurs assemblages, on empile en premier lieu les trois colonnes et la culasse inférieure. La culasse supérieure sera jointe tôle par tôle une fois les bobines seront montées.

L'isolation entre le circuit magnétique et les ferrures est assurée par une couche de papier, et celle entre les boulons et les culasses par des bagues.

Les dimensions des tôles et leur nombre sont données par le tableau VI.1 pour les colonnes et le tableau VI.2 pour les culasses.

Dimensions Gradins	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Nombre de tôles par colonne	Nombre total de tôles
1	645	120	38	126	378
2	645	110	24	80	240
3	645	100	14	46	138
4	645	85	18	60	180
5	645	65	14	46	138
6	645	40	10	34	102

Tableau VI.1

Dimensions Gradins	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Hauteur [mm]	Nombre de tôles par culasse	Nombre total de tôles
1	676	120	38	126	252
2	676	110	24	80	160
3	676	100	14	46	92
4	676	85	18	60	120
5	676	65	14	46	92
6	676	40	10	34	68

Tableau VI.2

VI.1.1.b. Choix des enroulements :

▪ Enroulement Basse Tension :

Une fois le choix des conducteurs est fait, on bobine sur un gabarit possédant deux extrémités limitées par des cales de progression qui à leur tour limitent la hauteur de bobinage.

On couvre, la surface extérieure de la bobine à l'aide d'un isolant en papier et on démonte le gabarit pour retirer la bobine. L'indice horaire donne le sens de bobinage.

La bobine une fois réalisée est pressée pour corriger sa hauteur de montage, et elle sera placée dans un four afin d'extraire l'humidité.

▪ Enroulement Haute Tension :

L'enroulement Haute Tension est constitué de deux groupes en parallèle, chaque groupe est composé de quatre galettes dont deux sont des bobines d'entrée et les deux autres sont des bobines de prise de réglage. Elles sont reliées en série.

Les enroulements du transformateur doivent satisfaire plusieurs exigences dont les plus importantes sont :

- ❖ L'enroulement doit être économique en tenant compte du prix du cuivre et du rendement du transformateur.
- ❖ Le régime thermique de l'enroulement doit correspondre à la norme, car une température trop élevée réduit nettement la vie du transformateur.
- ❖ L'enroulement doit résister aux contraintes inattendues d'un court circuit brusque.
- ❖ L'enroulement doit présenter la rigidité diélectrique nécessaire pour supporter la surtension.

VI.1.2. Partie constructive :**VI.1.2.a. la cuve :**

Elle est destinée à renfermer la partie active baignant dans de l'huile. Dans le fond de la cuve se trouve un dispositif d'écoulement du liquide de refroidissement et d'isolement. Les parois ondulées inférieures et supérieures de la surface latérale de la cuve sont assemblées par soudure, ces parois sont également soudées au fond de la cuve qui porte des tiges verticales permettant un bon emplacement de la partie décuvable.

VI.1.2.b. le couvercle :

Il est réalisé en acier A_{33} de 4 mm d'épaisseur, muni de cavités, de trous et d'autres accessoires pour la fixation des appareils de protection et des isolateurs de traversée.

VI.1.2.c. Isolateurs de traversée :

Les traversées sont constituées par un cylindre épais en porcelaine à l'intérieure duquel passe le conducteur en cuivre. Le cylindre présente un épaulement à l'endroit du passage dans le couvercle pour la réalisation du joint étanche.

VI.1.2.d. Conservateur d'huile:

Il est fixé au couvercle par des éclisses. Un indicateur de niveau d'huile est placé sur une face frontale du conservateur et sur l'autre face frontale est soudée une bride à laquelle est boulonné l'assécheur d'air.

VI.2. Essais :[7, 9, 12]

Comme tous les matériels électriques industriels, les transformateurs sortant des lignes de fabrications passent en plate forme d'essai pour subir un contrôle final.

Les essais effectués pour les transformateurs sont toujours définis par le contrat de vente et répondent aux prescriptions des normes françaises (UTE) ou des normes internationales (CEI) ou des normes nationales étrangères. Pour des transformateurs spéciaux ou appelés à travailler dans des conditions inhabituels, ou encore devant servir de prototype à une série, des essais particuliers peuvent être exécutés.

La Plate forme d'essais regroupe tous les moyens permettant d'obtenir les tensions, les courants, fréquences et puissances nécessaires, ainsi que les appareils de mesure.

❖ Classification des essais :

Généralement, les normes distinguent trois catégories d'essais :

VI.2.1. Essais individuels :

Ils permettent à l'utilisateur de vérifier le fonctionnement correct du transformateur et le respect des garanties, conformément à sa spécification technique. On distingue :

VI.2.1.a. Mesure de la résistance des enroulements :

La mesure des résistances doit être en courant continu afin d'éviter les effets d'inductance propre dans les enroulements.

Dans toutes les mesures de résistance, on doit veiller à réduire au minimum les effets de l'auto-induction par la stabilisation du courant.

VI.2.1.b. Mesure de rapport de transformation et vérification du groupe de couplage :

La vérification de groupe de couplage et la mesure du rapport de transformation sont effectuées sur chaque prise à l'aide d'un pont de mesure de rapport de transformation. La mesure consiste, dans son principe, à rechercher une tension primaire en phase avec une tension secondaire et d'en comparer les modules.

VI.2.1.c. Mesure des pertes et du courant à vide :

La méthode utilisée est celle des deux wattmètres.

Cet essai consiste à maintenir l'enroulement primaire en circuit ouvert et d'appliquer aux bornes du secondaire une tension.

La mesure est effectuée à la fréquence nominale de 50 Hz et sous une tension égale à la tension nominale, et elle doit être de forme aussi proche de la forme sinusoïdale.

VI.2.1.d. Essai en court circuit :

Cet essai consiste à court circuiter les bornes du secondaire, et d'appliquer une tension pratiquement sinusoïdale aux bornes du primaire.

La tension de court circuit et des pertes dues à la charge doivent être mesurées à la fréquence nominale de 50 Hz et le courant d'alimentation doit être réduit par rapport au courant nominal.

VI.2.1.e. Essai diélectrique :

Le but de cet essai est de vérifier l'isolement entre les enroulements de phase, spires, bobines, prises, ainsi qu'entre ces parties et la terre.

L'essai est déclaré satisfaisant s'il ne se produit aucun effondrement de la tension d'essai

VI.2.2. Essais de type :

Le but de ces essais est d'établir l'échauffement de l'huile au sommet en régime établi avec dissipation des pertes totales. On distingue :

VI.2.2.a. Mesure de l'échauffement de l'enroulement :

L'intérêt de cet essai est de déterminer la température de l'huile à la partie supérieure, ainsi que la température moyenne des enroulements.

Pour mesurer la température de l'huile dans la partie supérieure, on utilise des capteurs placés dans des doigts de gant dans le couvercle.

La température moyenne des enroulements est déterminée à partir de la variation de la résistance.

VI.2.2.b. Essai en onde pleine :

Le but de cet essai est de détecter la défaillance des isollements. Les tensions d'essai aux ondes de choc doivent être appliquées à chaque borne de ligne du transformateur.

VI.2.3. Essais spéciaux :

Ce sont des essais réalisés avec accord entre l'utilisateur et le constructeur, on distingue :

VI.2.3.a. Essai en onde coupée :

Cet essai doit être effectué en plus de l'essai en onde pleine. Les essais doivent comporter deux chocs en onde coupée, appliqués successivement à chaque borne de ligne du transformateur.

La tension appliquée doit être coupée sur la queue de l'onde, l'instant de coupure doit se situer entre 2 et 6 μ s après le début du choc.

VI.2.3.b. Mesure du bruit :

En général, le bruit est causé par :

- Les efforts électrodynamiques.
- Les efforts d'attraction entre la culasse et le noyau.
- Les effets du champ magnétique.

Les mesures sont effectuées à l'aide d'un sonomètre, le microphone est orienté perpendiculairement à la surface du transformateur.

Cahier des charges

Puissance nominale.....800 kVA

Tension primaire.....10 kV

Tension secondaire.....2, 73 kV

Tension de court circuit.....6 %

Pertes à vide.....1, 4 kW

Pertes en court circuit.....7 kW

Courant à vide.....1.3 %

Fréquence.....50 Hz

Le présent travail est consacré en un calcul d'un transformateur Leblanc, il à été mené dans le but d'avoir un transformateur ayant des caractéristiques permettant un fonctionnement normal.

Un calcul préliminaire à été fait en se basant sur le cahier des charges, à partir des dimensions de départ. Différentes contraintes (électriques, magnétiques, thermiques et mécaniques) ont été calculée, dans les différentes parties de la machine, en tenant compte des conditions réelles de fonctionnement.

Les résultats obtenus doivent être situés dans les limites admissibles établies par les expériences effectuées sur d'autres machines existantes. Dans le cas contraire, des corrections nécessaires de certains paramètres doivent être effectuées jusqu'à l'obtention des variantes répondant aux normes en vigueur et aux spécifications du cahier des charges.

Parmi les nombreux résultats satisfaisants obtenus, nous avons retenus celles répondant le mieux aux exigences du cahier des charges.

Le transformateur calculé, a donc les dimensions et caractéristiques permettant un bon fonctionnement.

L'élaboration de ce présent mémoire, nous a permis d'approfondir et d'enrichir nos connaissances dans le domaine de l'électrotechnique en général et de la technologie de fabrication des transformateurs en particulier.

Enfin, nous espérons avoir contribué au calcul des transformateurs et à l'enrichissement de la documentation de L'ELECTRO-INDUSTRIE, et ainsi pour permettre la réalisation de ce transformateur.

Annexe 1

Démonstration des relations de la tension de court circuit et du diamètre de la colonne.

- Tension de court circuit :
- Valeur réduite de la tension de court circuit :

$$u_{cc} = \frac{U_{cc}}{U_{ph1}}$$

$$u_{cc} = \frac{\sqrt{U_{ccr}^2 + U_{cca}^2}}{U_{ph1}} = \frac{\sqrt{(R \cdot I_{ph1})^2 + (X_{cc} \cdot I_{ph1})^2}}{U_{ph1}}$$

- Composante réactive de la tension de court circuit :

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

$$U_{ccr} = \frac{X_{cc} \cdot I_{ph1}}{U_{ph1}}$$

- La réactance de fuite X_{cc} :

Pour des enroulements concentriques, la réactance de fuite est donnée par :

$$X_{cc} = \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot f \cdot D_{12} \cdot n^2 \cdot a_r \cdot K_R}{h_B} \quad , \text{ avec } \beta = \frac{\pi \cdot D_{12}}{h_B}$$

$$X_{cc} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot n^2 \cdot \beta \cdot a_r \cdot K_R$$

Or :

$$U_{sp} = \frac{U_{ph1}}{n} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot B_c \cdot S_{fer}$$

Donc :

$$U_{ph1} = n \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot B_c \cdot S_{fer} \quad , \text{ avec } S_{fer} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot K_u$$

$$U_{ccr} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot n^2 \cdot \beta \cdot a_r \cdot K_R}{n \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot B_c \cdot S_{fer}}$$

$$U_{ccr} = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot n \cdot \beta \cdot a_r \cdot K_R}{\sqrt{2} \cdot B_c \cdot S_{fer}} \cdot I_{ph1}$$

D'où :

$$U_{\text{ccr}} = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot n \cdot \beta \cdot a_r \cdot K_R \cdot 4}{\sqrt{2} \cdot B_c \cdot \pi \cdot D^2 \cdot K_u} \cdot I_{\text{ph1}}$$

➤ Diamètre de la colonne :

L'expression de la puissance apparente par colonne est donnée par :

$$S_c = U_{\text{ph1}} \cdot I_{\text{ph1}}$$

$$U_{\text{ph1}} = \frac{n \cdot \sqrt{2} \cdot \pi^2 \cdot f \cdot B_c \cdot D^2 \cdot K_u}{4}$$

$$I_{\text{ph1}} = \frac{U_{\text{ccr}} \cdot \sqrt{2} \cdot B_c \cdot \pi \cdot D^2 \cdot K_u}{2 \cdot \mu_0 \cdot n \cdot \beta \cdot a_r \cdot K_R \cdot 4}$$

Donc :

$$S_c = \frac{n \cdot \sqrt{2} \cdot \pi^2 \cdot f \cdot B_c \cdot D^2 \cdot K_u}{4} \cdot \frac{U_{\text{ccr}} \cdot \sqrt{2} \cdot B_c \cdot \pi \cdot D^2 \cdot K_u}{2 \cdot \mu_0 \cdot n \cdot \beta \cdot a_r \cdot K_R \cdot 4}$$

$$S_c = \frac{\pi^3 \cdot f \cdot B_c^2 \cdot D^4 \cdot K_u^2 \cdot U_{\text{ccr}}}{16 \cdot \mu_0 \cdot \beta \cdot a_r \cdot K_R}$$

D'où :

$$D = \sqrt[4]{\frac{16 \cdot \mu_0 \cdot \beta \cdot a_r \cdot K_R \cdot S_c}{\pi^3 \cdot f \cdot B_c^2 \cdot K_u^2 \cdot U_{\text{ccr}}}}$$

Annexe 2

Démonstration de la valeur de α pour laquelle le rendement est maximale.

le rendement est maximale pour $\frac{d\eta}{d\alpha} = 0$

On a :

$$\eta(\%) = \left(1 - \frac{P_0 + \alpha^2 P_{cc}}{S_n \cdot \alpha \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \alpha^2 P_{cc}}\right) \cdot 100$$

$$\frac{d\eta}{d\alpha} = 0 \Rightarrow \frac{d}{d\alpha} \left[\left(1 - \frac{P_0 + \alpha^2 P_{cc}}{S_n \cdot \alpha \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \alpha^2 P_{cc}}\right) \cdot 100 \right] = 0$$

$$\frac{d}{d\alpha} \left[\frac{S_n \cdot \alpha \cdot \cos \varphi_2}{S_n \cdot \alpha \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \alpha^2 P_{cc}} \right] = 0$$

$$\Rightarrow \left[\frac{S_n \cdot \cos \varphi_2 (S_n \cdot \alpha \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \alpha^2 P_{cc}) - (S_n \cdot \cos \varphi_2 + 2\alpha P_{cc}) \cdot S_n \cdot \alpha \cdot \cos \varphi_2}{(S_n \cdot \alpha \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \alpha^2 P_{cc})^2} \right] = 0$$

$$\frac{d\eta}{d\alpha} = 0 \Rightarrow S_n \cdot \cos \varphi_2 (S_n \cdot \alpha \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \alpha^2 P_{cc}) - (S_n \cdot \cos \varphi_2 + 2\alpha P_{cc}) \cdot S_n \cdot \alpha \cdot \cos \varphi_2 = 0$$

$$S_n^2 \cdot \alpha \cdot \cos^2 \varphi_2 + S_n \cdot \cos \varphi_2 P_0 + S_n \cdot \cos \varphi_2 \cdot \alpha^2 \cdot P_{cc} - S_n^2 \cdot \alpha \cdot \cos^2 \varphi_2 - 2 \cdot \alpha^2 \cdot P_{cc} \cdot S_n \cdot \cos \varphi_2 = 0$$

$$S_n \cdot \cos \varphi_2 P_0 - \alpha^2 \cdot P_{cc} \cdot S_n \cdot \cos \varphi_2 = 0 \Rightarrow (P_0 - \alpha^2 \cdot P_{cc}) S_n \cdot \cos \varphi_2 = 0$$

$$P_0 - \alpha^2 \cdot P_{cc} = 0$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{P_0}{P_{cc}}}$$

Bibliographie

- [1] F. Milsant « Electrotechnique : Machines électriques », Editions Berti.
- [2] N. Bouaziz « Modélisation par élément finis d'un transformateur de puissance », Mémoire de fin d'études ingénieur, université de Tizi-Ouzou, 2005.
- [3] K. Djaroun et F.Kaci « Calcul d'un transformateur hermétique de distribution 315 KVA, 10 KV / 0,4 KV », Mémoire de fin d'études ingénieur, université de Tizi-Ouzou, 2003.
- [4] J-L Dalmaso « Cours d'électrotechnique », Tome 2, Traitement de l'énergie électrique, Editions Belin, 1984.
- [5] A. Fouillé « Electrotechnique à l'usage des ingénieurs », Tome 2, Machines électriques, 7^{ème} édition, Editions Dunod, Paris 1966.
- [6] A. Guilbert « Circuit magnétique à flux alternatif : Transformateurs », Editions Eyrolles- Masson et Cie Editeurs, 1973.
- [7] B. Hochart, coordonnateur « Le transformateur de puissance », 2^{ème} éditions, Technique et documentation (Lavoisier) ,1988 .
- [8] R.P. Bouchard et G. Olivier « Electrotechnique », 2^{ème} édition, Presse internationale polytechnique, Canada 1989.

[9] Norme Internationale, Document ELECTRO-INDUSTRIE, AZAZGA. (CEI 78)

[10] R. Dehak et A. Kasdi « calcul d'un transformateur hermétique triphasé à accouchés de distribution 100 KVA, 30 kV / 0,4 kV », Mémoire de fin d'étude ingénieur université de Tizi-Ouzou, 2002.

[11] M. Kostenko et L. Piotroski « Machines électriques », Tome 2, Machines à courant alternatif 3^{ème} édition, Editions Mir, Moscou 1979.

[12] P. Roberjot et J. Loubignac « Electrotechnique appliquée », Tome 1, Essais des machines électriques 5^{ème} édition, Edition Dunod, Paris 1976.