

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

**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES**



**Faculté des Sciences de l'Ingénieur**

**Département Ingénierie des Systèmes Electriques**

**Mémoire de Master**

Présenté par

**KARALI Youcef**

**SI BACHIR Imad Eddine**

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machines Electriques

---

**Conception assistée par ordinateur d'un  
transformateur de puissance triphasé**

---

**Soutenu le 17 / 07 / 2019 devant le jury :**

Mr. HAMEL	Meziane	MCB	UMBB	Président
Melle LARABI	Zina	MAA	UMBB	Examinatrice
Mr BENGUESMIA	Hani	MCB	UM'sila	Examinateur
Mme M'ZIOU	Nassima	Professeur	UMBB	Encadreur
Mr AIT IZEM	Belaid	Ingénieur	ENEL	Co- Encadreur

## ***Remerciements***

*Nous tenons à remercier en tout premier lieu notre dieu, pour le courage qu'il nous a donné afin d'accomplir le présent memoire.*

*Nous présentons nos plus vifs remerciements à Notre promotrice Madame **M'ziou** pour toute l'aide qu'elle nous a apporté durant toute la durée de ce travail.*

*Nos remerciements vont aussi à **M'-Belaid** (Ingénieur du bureau d'études transformateurs d'Electro-Industriel) d'avoir assuré notre encadrement au sein de l'étude pendant la réalisation de ce mémoire.*

*Nos remerciements vont aussi à **M'-Hamel** (maitre de conférence) pour sa disponibilité et l'intérêt constant qu'il n'a cessé de nous apporter pour l'élaboration de ce mémoire.*

*Enfin nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation sans oublier tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin pour l'accomplissement de ce travail.*

# *Dédicaces*

*C'est avec une profonde gratitude et sincères mots que je dédie ce modeste travail à :*

*La mémoire de mon père que dieu l'accueille en son vaste paradis.*

*La lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur : maman que j'adore.*

*Mes frères, ma sœur, mes belles sœurs, et mes adorables nièces et neveux,*

*Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagnaient durant mon chemin d'études supérieures, mes aimables amis, collègues d'étude, et frères de cœur.*

*A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.*

**YOUCEF**

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à mes chers parents qui ne cessent de me donner avec amour le nécessaire pour que je puisse arriver à ce que je suis aujourd'hui.*

*Que Dieu vous protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je puisse vous combler de bonheur.*

*Je dédie aussi ce travail à :*

*Mon frère, ma sœur et leurs familles.*

*Mes oncles et mes tantes.*

*Tous mes cousins et cousines.*

*Tous mes amis, mes collègues et tous ceux qui m'estiment.*

**IMAD**

# Table des matières

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre 1</b>	
<b>Généralités sur les transformateurs de puissance</b>	
I.1 Définition .....	2
I.2 Principe de fonctionnement .....	2
I.3 Constitution d'un transformateur .....	3
I.3.1 Partie active .....	3
I.3.1.1 Circuit magnétique .....	3
I.3.1.2 Les enroulements .....	5
I.3.1.3 Prises de réglage.....	6
I.3.1.4 Isolement .....	7
I.3.1.5 Les diélectriques.....	7
I.3.2 Partie constructive .....	7
I.3.2.1 La cuve .....	7
I.3.2.2 Le couvercle .....	9
I.4 Choix des couplages .....	10
I.4.1 Connexion étoile .....	10
I.4.2 Connexion triangle .....	11
I.4.3 Connexions zigzag .....	11
I.5 Caractéristiques industrielles d'un transformateur .....	12
I.5.1 Paramètres techniques .....	12
I.5.1.1 Puissance nominale .....	12
I.5.1.2 Tension nominale .....	12
I.5.1.3 Courant nominal .....	12
I.5.1.4 Tension de court-circuit ( $U_{CC}$ ) .....	12
I.5.1.5 Pertes à vide.....	12
I.5.1.6 Pertes par effet joule .....	13
I.5.1.7 Rapport de transformation .....	13
I.5.2 paramètres d'exploitation .....	13
I.5.2.1 Chute de tension.....	13
I.5.2.2 Le rendement.....	14

## Chapitre 2

### Calculs électromagnétiques

II. Introduction .....	16
II.1 Calcul préliminaire des dimensions principales .....	16
II.1.1 le diamètre de la colonne .....	16
II.1.2 Le diamètre du canal de fuite $d_{12}$ .....	16
II.1.3 La hauteur des enroulements $h_b$ .....	18
II.2 Calcul des enroulements .....	20
II.2.1 Détermination des paramètres de l'enroulement basse tension .....	20
II.2.1.1 Nombre de spires basse Tension $w_2$ .....	20
II.2.1.2 Tension aux bornes d'une spire .....	20
II.2.1.3 Choix de la section $S_2$ des conducteurs Basse Tension .....	21
II.2.2 Détermination des paramètres de l'enroulement haute Tension.....	24
II.2.2.1 Calcul du nombre de spire HT ( $w_1$ ).....	24
II.2.2.2 Calcul de la section des conducteurs HT ( $S_1$ ) .....	24
II.2.2.3 Calcul du diamètre des conducteurs HT ( $d$ ) .....	24
II.2.3 Calcul des dimensions .....	25
II.2.3.1 Basse tension.....	25
II.2.3.2 Haute tension .....	25
I.3 Dimensionnement radial des enroulements et du circuit magnétique .....	27
II.3.1 Le diamètre intérieur de la bobine basse tension ( $D_{i2}$ ) .....	27
II.3.2 Diamètre extérieur de la bobine basse Tension ( $D_{ex2}$ ).....	27
II.3.3 Diamètre intérieur de la bobine Haute Tension ( $D_{i1}$ ) .....	27
II.3.4 Diamètre extérieur de la bobine Haute Tension ( $D_{ex1}$ ).....	28
II.3.5 Hauteur de la fenêtre $H_c$ .....	28
II.3.6 La distance Entre l'axe et la colonne $E_c$ .....	28
II.3.7 Nombre de gradins.....	28
II.3.8 Longueur de la fenêtre $L_f$ .....	30
II.3.9 La hauteur du noyau $H_n$ .....	30
II.3.10 La longueur du noyau $L_n$ .....	30
II.3.11 Dimensionnement de la cale de progression .....	30
II.4 Recalcul des paramètres préliminaires précédents et vérification de la tension .....	31
Conclusion.....	32

## Chapitre 3

### Calcul des pertes

III. Introduction .....	33
III.1 Pertes fer (à vide) $P_o$ .....	33
III.1.1 Calcul des pertes dans le noyau $P_o$ .....	33
III.1.2 Calcul des pertes supplémentaires dans les coins $P_{s_1}$ .....	35
III.1.3 Calcul des pertes supplémentaire dans les colonnes et les culasses $P_{s_2}$ .....	36
III.2 Calcul des pertes joules $P_{cc}$ .....	36
III.2.1 Calcul des pertes joules totales en charge $P_{cc_2}$ pour l'enroulement BT .....	36
III.2.1.1 Calcul des pertes joules au secondaire .....	36
III.2.1.2 Pertes externes $P_{ex}$ .....	37
III.2.1.3 Pertes internes $P_{in}$ .....	38
III.2.1.4 Pertes par connexion.....	38
III.2.1.5 Pertes par effet pelliculaire $P_{sup_2}$ .....	39
III.2.2 Calcul des pertes joules totales en charge $P_{cc_1}$ pour l'enroulement HT .....	40
III.2.2.1 Calcul des pertes joules au primaire .....	40
III.2.2.2 Calcul des pertes par connexion .....	41
III.2.2.3 Pertes par effet pelliculaire $P_{sup_1}$ .....	41
III.2.3 Calcul des pertes joules $P_{cc}$ : .....	42
III.3 Calcul définitif de la tension du court-circuit $U_{cc\%}$ .....	43

## Chapitre 4

### Applications et résultats

IV. Introduction .....	44
IV.1 Ansys-Maxwell .....	44
IV.2 Equations de Maxwell .....	45
IV.2.1 Lois de comportement des milieux .....	45
IV.3 Applications .....	46
IV.3.1 Géométrie du problème.....	47
IV.3.2 Les matériaux utilisés .....	48
IV.3.2.1 Circuit magnétique .....	48
IV.3.2.2 Enroulements .....	49
IV.3.3 Type de solution .....	49
IV.4 Application 01 : Essai à vide du transformateur .....	49

IV.5 Application 02 : Essai en court-circuit .....	52
IV.5 Application 03 : Transformateur en charge .....	55
IV. Conclusion .....	57

## **Chapitre 5**

### **Construction d'un transformateur de puissance**

V.1 Introduction .....	58
V.2 Partie active .....	58
V.2.1 Noyau (le circuit magnétique) .....	58
V.2.2 Réalisation des enroulements .....	58
V.3 Partie constructive .....	61
V.3.1 La cuve .....	61
V.3.2 Couvercle.....	61
V.3.3 Isolateurs de traversées.....	61
V.3.4L conservateur d'huile.....	61
V.3.5 Boulons et tiges .....	61

<b>Conclusion générale</b> .....	67
----------------------------------	----

### **Bibliographie**



## Liste des figures

### Chapitre I

<b>Fig. I.1</b> Schéma de principe d'un transformateur monophasé .....	3
<b>Fig. I.2</b> Types de circuits magnétiques .....	4
<b>Fig. I.3</b> Schéma de montage du noyau .....	5
<b>Fig. I.4</b> Enroulement primaire a cinq réglages par commutateur hors tension.....	
Couplage Y .....	6
<b>Fig I.5</b> La cuve .....	8
<b>Fig 1.6</b> Vue d'ensemble de couvercle.....	10
<b>Fig I.7</b> Symbole d'un transformateur Etoile-Etoile .....	10
<b>Fig I.8</b> Schéma électrique de la connexion étoile .....	10
<b>Fig I.9</b> Symbole d'un transformateur Triangle – Etoile .....	11
<b>Fig I.10</b> Schéma électrique de la connexion triangle.....	11
<b>Fig I.11</b> Symbole d'un transformateur Etoile-Zigzag .....	11
<b>Fig I.12</b> Schéma de connexion zigzag .....	11

### Chapitre II

<b>Fig II.1</b> Coupe générale de la colonne.....	19
<b>Fig II.2</b> Représentation des gardins dans une colonne .....	29
<b>Fig II.3</b> Représentation des dimensions de la partie active .....	31

### Chapitre III

<b>Figure III.1.</b> Les éléments du noyau .....	34
--	----

### Chapitre IV

<b>Fig. IV.1</b> Interface de Maxwell 2D .....	44
<b>Fig. IV.2</b> Schéma du transformateur triphasé à noyau.....	47
<b>Fig. IV.3</b> géométrie du transformateur sous l'environnement Ansys-Maxwell 2D .....	48

<b>Fig. IV. 4 :</b> Courbe de la première aimantation de la tôle magnétique utilisée à Electro-Industries pour la réalisation du transformateur triphasé à noyau. ....	49
<b>Fig. IV.5</b> Maillage du champ électrique .....	50
<b>Fig. IV.6</b> Lignes du flux.....	50
<b>Fig. IV.7</b> Répartition d'induction magnétique.....	51
<b>Fig. IV.8</b> Répartition du champ magnétique.....	51
<b>Fig. IV.9</b> Tension primaire pour les trois phases.....	52
<b>Fig. IV.10</b> Tension secondaire pour les trois phases .....	52
<b>Fig. IV.11</b> Schéma du transformateur en court-circuit par phase.....	53
<b>Fig. IV.12</b> Tension primaire pour les trois phases.....	53
<b>Fig. IV.13</b> Tension secondaire pour les trois phases .....	54
<b>Fig. IV.14</b> Courant primaire pour les trois phases.....	54
<b>Fig. IV.15</b> Courant secondaire pour les trois phases .....	54
<b>Fig. IV.16</b> schéma du transformateur en charge par phase.....	55
<b>Fig. IV.17</b> Tension primaire pour les trois phases.....	56
<b>Fig. IV.18</b> Tension secondaire pour les trois phases .....	56
<b>Fig. IV.19</b> Courant primaire pour les trois phases .....	57
<b>Fig. IV.20</b> Courant secondaire pour les trois phases .....	57

## **Chapitre V**

<b>FIG V.1</b> Disposition des tôles et technique d'empilage.....	59
<b>FIG V.2</b> Montage du noyau .....	59
<b>Fig V.3</b> Montage de la cuve .....	62
<b>Fig V.4</b> Vue d'ensemble de couvercle .....	63
<b>Fig V.5</b> Traversée.....	64
<b>Fig V.6</b> Conservateur d'huile.....	65
<b>Fig V.7</b> Représentation générale du transformateur .....	66

## Liste des tableaux

### Chapitre II

Tab II.1 les valeurs du coefficient $K_{a_2}$ .....	17
Tab II.2 La largeur du canal pour les transformateurs immergés dans l'huile.....	17
Tab II.3 Les valeurs du $\beta$ .....	18
Tab II.4 les valeurs de $K_{pcc}$ .....	22
Tab II.5 les valeurs normalisées des sections des conducteurs en aluminium.....	23
Tab II.6 la dimension correspondante des gradins donnés par l'ENEL.....	29

### Chapitre III

Tab III.1 Coefficient correcteur des pertes spécifiques de $K_{BP}$ .....	33
Tab III.2 Les valeurs des facteurs "e" et "F" .....	38

### Chapitre IV

Tab IV.1 Dimensions du transformateur triphasé à noyau.....	47
---	----

## Résumé

Dans ce travail, nous nous intéressons à faire une conception d'un transformateur de puissance triphasé bobiné en aluminium qui sera fabriqué par l'entreprise Electro-Industrie. Le transformateur proposé pour ce travail est de puissance apparente de 630 KVA , de tension primaire 10kV et de tension secondaire 0,4kV.

Dans cette étude Nous nous présentons les différentes calculs pour le dimensionnement de notre transformateur , nous calculons ensuite les différentes pertes qui apparaissent lors de son fonctionnement à vide et en court circuit. Nous utilisons enfin le logiciel "Ansys-Maxwell" pour modéliser notre transformateur .

**Mots clés :** Transformateur, Conception, "Ansys-Maxwell".

## Abstract

In this work, we are interested in designing a three-phase wound aluminum power transformer to be manufactured by *Electro-Industrie*. The transformer proposed for this work has an apparent power of 630 KVA, a primary voltage of 10kV and a secondary voltage of 0.4kV.

In this study we present ourselves with the different calculations for the sizing of our transformer, we then calculate the different losses that appear during its operation at no load and in short circuit. Finally, we use the "Ansys-Maxwell" software to model our transformer.

**Keywords :** Transformer, Design, "Ansys-Maxwell".

## ملخص

في هذه الدراسة ، نحن مهتمون بتصميم محول طاقة ثلاثي الأطوار مصنوع من الألمنيوم حيث يتم تصنيعه بشركة "Electro-Industrie" بتقدير قوة هذا المحول ب 630 kVA ، بتواتر أولي يبلغ 10kV وتواتر ثانوي يقدر ب 0,4. في هذه المذكرة، نقوم بمختلف الحسابات المختلفة من أجل تحجيم محول الطاقة لدينا ، ثم نقوم بحساب مختلف الطاقات الضائعة. أخيرًا ، نستخدم برنامج "Ansys-Maxwell" لتصميم هذا المحل.

**كلمات البحث:** محول ، تصميم ، "Ansys-Maxwell".

# Cahier des charges

Puissance nominale .....  $S_n = 630 \text{ kVA}$

Tension primaire.....  $U_{1n} = 10 \text{ kV}$

Tension secondaire.....  $U_{2n} = 400 \text{ V}$

Fréquence.....  $f = 50 \text{ Hz}$

Couplage .....  $\Delta y11n$

Pertes à vide .....  $P_0 = 1160 \text{ W}$

Pertes en charge .....  $P_{cc} = 6500 \text{ W}$

Tension du court-circuit .....  $U_{cc} = 6 \%$

Courant à vide .....  $I_0 = 1.3 \%$

Température ambiante .....  $T = 40^\circ\text{C}$

# Introduction générale

## Introduction générale

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

Il y'a donc nécessité de transporter cette énergie vers les centres urbains et les sites industriels.

Le transformateur, par ses différentes facettes d'utilisation, rend possible ce transport économique et se trouve présent à toutes les étapes d'utilisation de l'énergie électrique, depuis le transport jusqu'à l'utilisation. L'intérêt particulier porté aux transformateurs réside dans le fait qu'ils peuvent augmenter ou diminuer considérablement les paramètres électriques, courant et tension.

Notre étude consiste à faire une conception d'un transformateur de puissance triphasé bobiné en aluminium. Le transformateur proposé pour ce travail est de puissance apparente de 630 KVA, de tension primaire et secondaire 10kV/0,4kV respectivement et qui fonctionne à une température ambiante de 40°C. Nous avons utilisé un logiciel de modélisation qui est bien **l'Ansys-Maxwell** pour l'étude électromagnétique.

Ce transformateur sera fabriqué par l'entreprise Electro-Industries.

Pour réaliser cette étude notre mémoire est composé de quatre chapitres répartis comme suit:

Dans le premier chapitre nous présentons quelques définitions et généralités sur le transformateur triphasé.

Dans le deuxième chapitre nous présentons les différents calculs pour le dimensionnement de la partie active du transformateur triphasé sur la base d'un calcul électromagnétique.

Dans le troisième chapitre on calcule les différentes pertes, qui apparaissent lors de son fonctionnement à vide et en court-circuit.

Dans le quatrième chapitre on va modéliser notre transformateur avec le logiciel "Ansys-Maxwell"

Et dans le dernier chapitre sont présentées, les différentes étapes pour la réalisation d'un transformateur triphasé.

Enfin, on termine par une conclusion générale.

# **Chapitre 1**

## **Généralités sur les transformateurs de puissance**



### I.1 Définition

Le transformateur est une machine statique qui permet de transformer une tension ou un courant d'une certaine fréquence en une autre tension ou un autre courant de même fréquence.

Le transformateur comporte deux enroulements, l'un dit primaire qui reçoit la puissance active de la source, l'autre dit secondaire qui restitue à son tour cette même puissance. Si la tension d'alimentation appliquée au primaire est plus basse que celle délivrée par le secondaire, le transformateur fonctionne en élévateur, dans le cas inverse en abaisseur [2].

### I.2 Principe de fonctionnement [3]

Le transformateur utilise les effets de l'induction magnétique. Il comporte deux enroulements qui embrassent un flux magnétique commun.

$$E = - \frac{d\phi}{dt} \quad (I.1)$$

Si l'on applique un courant alternatif aux bornes du bobinage primaire, celui-ci engendre dans le circuit magnétique un flux alternatif dont les variations produisent les forces électromotrices suivantes :

$$E_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (I.2)$$

Et 
$$E_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (I.3)$$

$N_1$  et  $N_2$  sont respectivement les nombres de spires des enroulements primaires et secondaires. Le rapport théorique des deux forces électromotrices est :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (I.4)$$

D'où : 
$$E_2 = E_1 \frac{N_2}{N_1} \quad (I.5)$$

Et 
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (I.6)$$

$E_1$  et  $E_2$  sont respectivement les F.E.M au primaire et au secondaire. Il existe entre la tension primaire et la tension secondaire un rapport égal au quotient du nombre des spires du primaire au nombre de spires du secondaire.

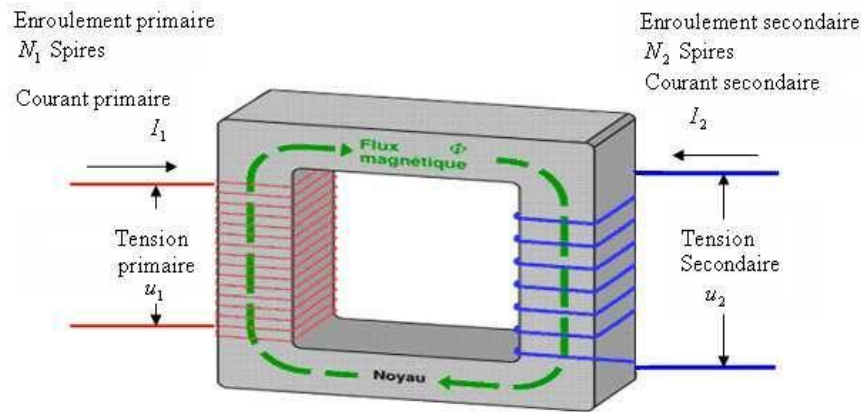


Fig. I.1 Schéma de principe d'un transformateur monophasé [2].

### I.3 Constitution d'un transformateur

Le transformateur comporte deux parties essentielles

- La partie active.
- La partie constructive.

#### I.3.1 Partie active

Les composants actifs du transformateur assurant la conversion du courant sont le circuit et les enroulements.

##### I.3.1.1 Circuit magnétique [8]

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

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

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

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

Notons que les circuits magnétiques sont de deux types principaux:

- 1- **A colonnes** : dans lesquelles les enroulements entourent les colonnes du noyau.
- 2- **Cuirasses** : dans lesquelles les enroulements sont partiellement entourés par le noyau.

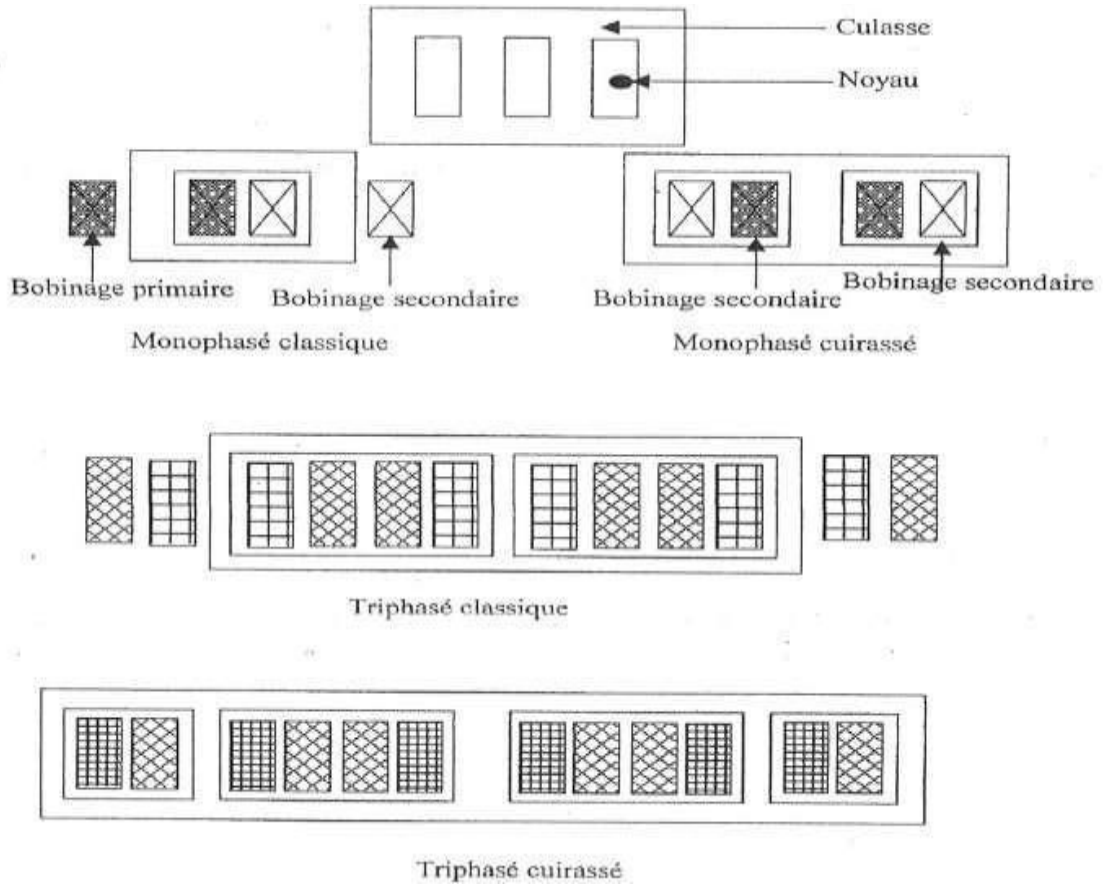


Fig. I.2 Types de circuits magnétiques [2].

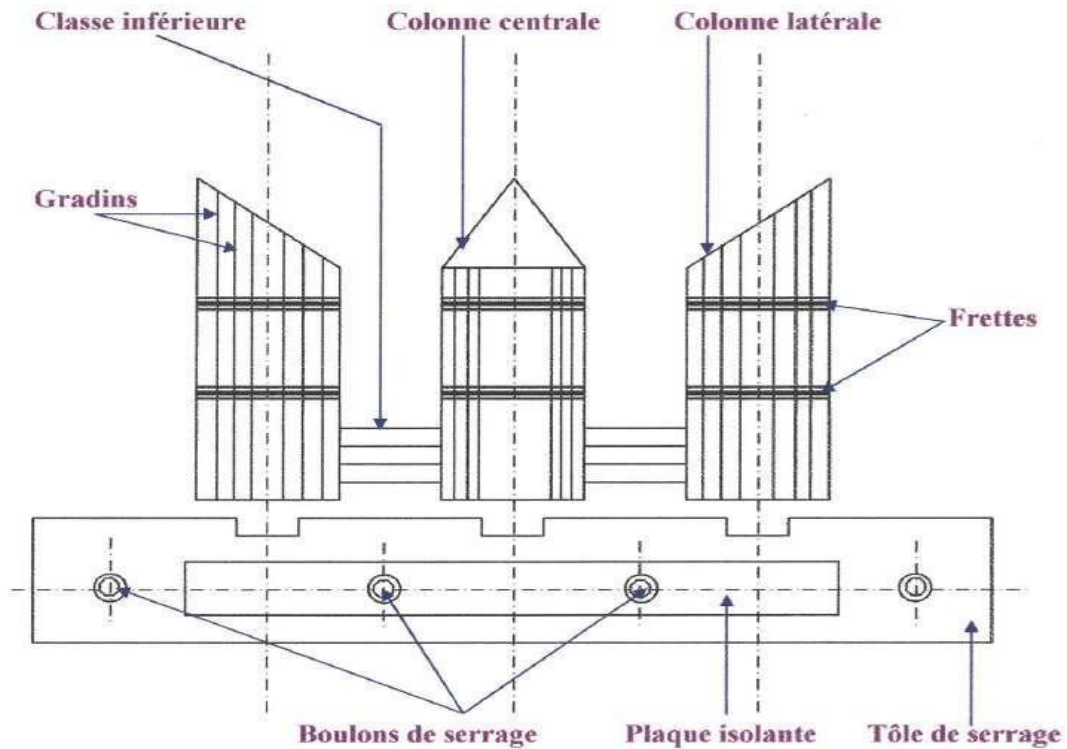


Fig. I.3 Schéma de montage du noyau [2].

### I.3.1.2 Les enroulements [3]

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

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

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

Il existe quatre types d'enroulement, qui sont déterminés en fonction de la puissance et la tension imposées par le cahier des charges, à s'avoir :

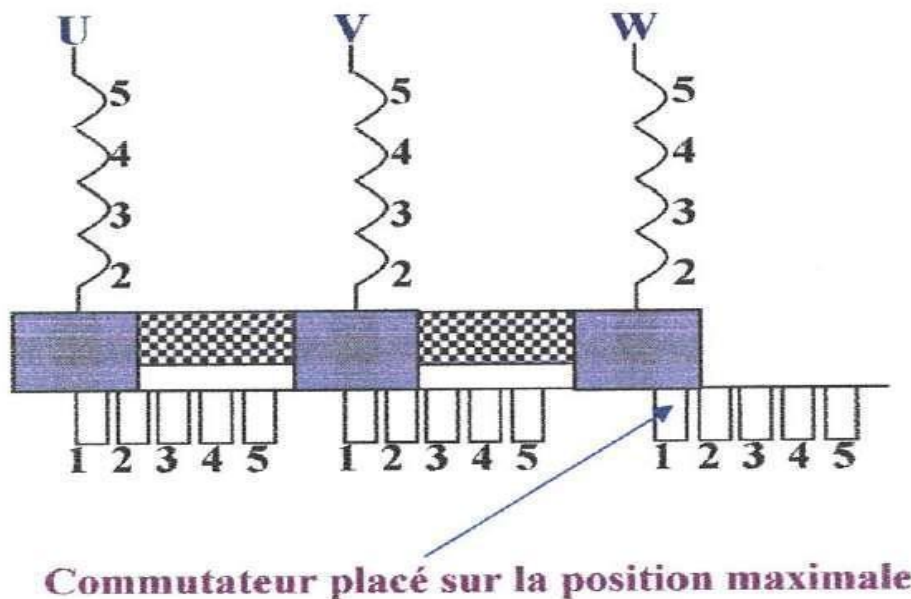
- Enroulements concentriques en couche en fils rond en vernis.

- Enroulements concentriques en méplat isolé au papier.
- Enroulements concentriques alternés en méplat isolé au papier.
- Enroulements concentriques à galettes en fil rond isolé au papier.

### I.3.1.3 Prises de réglage

La stabilisation de la tension dans les limites prescrites est réalisée au moyen d'un dispositif, permettant la variation du nombre de spires de réglage dispose au primaire ou au secondaire.

Le cahier des charges prescrit que celui-ci soit dispose sur le primaire.



**Fig. I.4** Enroulement primaire a cinq réglages par commutateur hors tension  
Couplage Y [2].

Pour des raisons d'ordre pratique, les spires de réglage sont enroulées sur la dernière couche du primaire, ce qui facilite leur construction et leur connexion au commutateur.

Conformément au cahier des charges, le réglage se fait hors tension a cinq prises fixes plus ou moins 5% [4].

- ❖ Position 1 (prise soustractive) :  $U_n - 2 \times 2.5\%$  ( $U_n$  : tension nominale)
- ❖ Position 2 (prise soustractive) :  $U_n - 2.5\%$
- ❖ Position 3 (prise normale) :  $U_n$
- ❖ Position 4 (prise additive) :  $U_n + 2.5\%$
- ❖ Position 5 (prise additive) :  $U_n + 2 \times 2.5\%$

**I.3.1.4 Isolement**

L'isolation de la partie active est d'une grande importance majeure de déterminante pour le fonctionnement du transformateur ; pour cela les conducteurs, les bobines et les connexions doivent être isolées entre eux entre la masse, du circuit magnétique, de la cuve et du couvercle.

**I.3.1.5 Les diélectriques**

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

- ❖ De l'air pour les petits transformateurs BT.
- ❖ De l'huile très employé dans tous les transformateurs de puissance, mais elle présente des risques d'incendies et d'explosion.
- ❖ Du pyralène ou diélectrique chlore qui est incombustible (interdit en France car au-delà de 3000°C, il se transforme en dioxine, poison très dangereux).
- ❖ Du quartz ; c'est un sable qui étouffe les flammes mais rend le refroidissement plus difficile.

Le diélectrique assure à la fois l'isolement et le refroidissement du transformateur.

**I.3.2 Partie constructive**

Elle est constituée de pièces mécaniques et des accessoires destinés à la fixation, la protection et le refroidissement de la partie active et qui se résume comme suit :

- La cuve
- Le couvercle

**I.3.2.1 La cuve**

Le rôle de la cuve est de servir de contenant au diélectrique liquide, de support et de protection mécanique à la partie active. Elle permet également l'évacuation de la chaleur. La cuve est équipée de divers dispositifs dont les crochets, les galets les vannes, la plaque signalétique.

Par ailleurs, elle doit répondre aux exigences suivantes :

- résistance mécanique et rigidité nécessaire pour éviter toute déformation sous l'effet du poids de la partie active, de l'huile et des charges.
- bonne étanchéité.
- grande surface en contact avec l'air pour faciliter le refroidissement.

Le type de cuve qui nous parait le mieux adapté est la cuve ailettes (ondulations). Elle est constituée de 03 parties fondamentales :

**a. Les parois ondulées :**

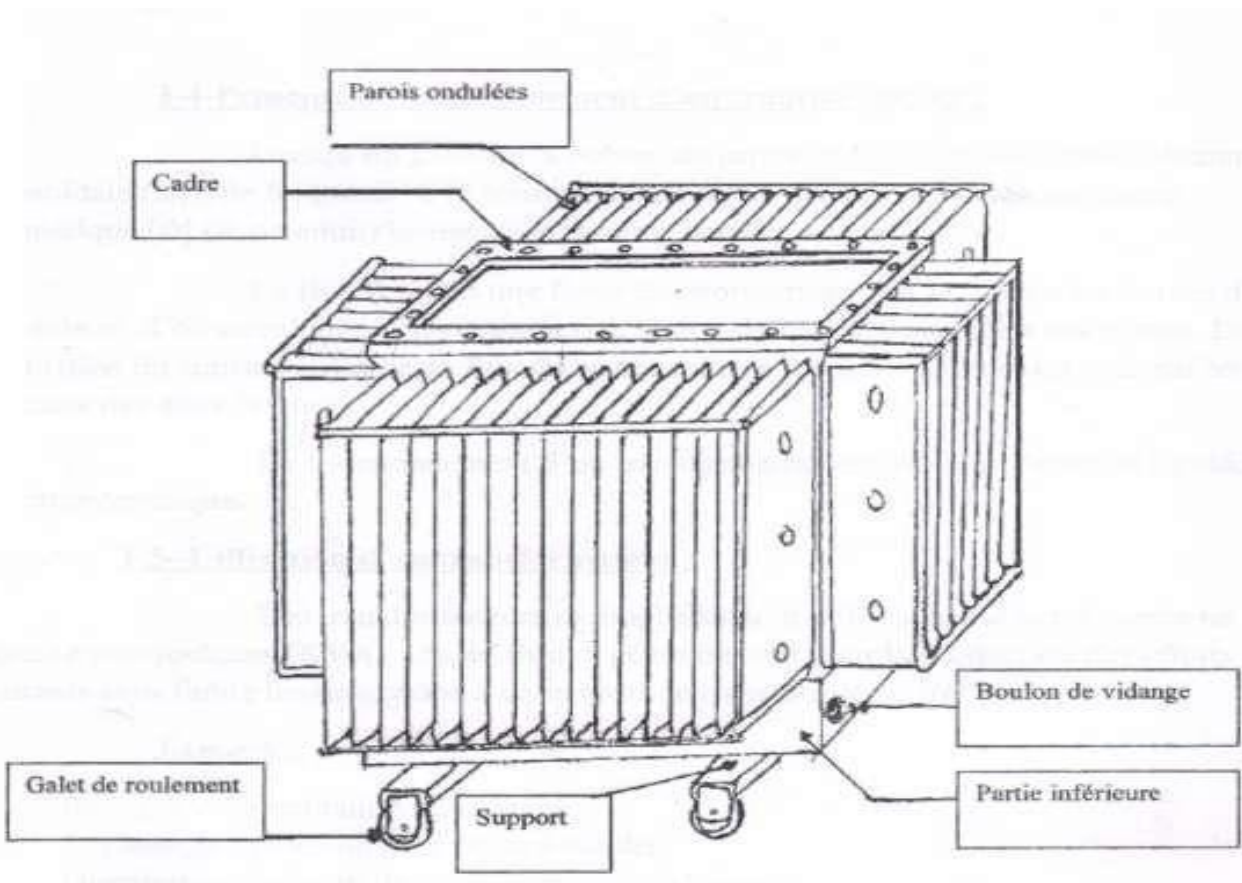
Elles sont les quatre facettes de la cuve en forme d'ondulations qui servent de surface de dissipation à chaleur.

**b. La partie inférieure :**

C'est la base (fond) de la cuve qui sert également de contenant au diélectrique liquide (l'huile).

**c. Le cadre :**

Il est de forme rectangulaire, se situe au niveau supérieur de la cuve, et sur lequel sera monté le couvercle.



**Fig I.5** La cuve [2].

**I.3.2.2 Le couvercle**

Le rôle du couvercle est de fermer la cuve d'où la nécessité d'un joint étanche. Par ailleurs il sert de support aux accessoires suivants :

❖ Les traversées haute et basse tension ont pour rôle d'assurer à travers le couvercle, la liaison électrique entre les extrémités des enroulements primaires et secondaires d'une part et les lignes d'arrivée et de départ d'autre part. Ces traversées doivent satisfaire à certaines conditions dont les principales sont :

- La résistance aux efforts mécanique.
- L'isolement de la connexion par rapport au couvercle.
- La fixation étanche et robuste sur le couvercle.
- La conservation de l'huile.

❖ Manette et commutateur de réglage de tension :

L'enroulement primaire est muni de prise permettant l'ajustement de la tension secondaire à la valeur désirée. Ce réglage est réalisé au moyen d'un commutateur logé dans la cuve et manœuvrable hors tension de l'extérieur à l'aide d'une manette placée sur le couvercle.

❖ Doigt de gant : Permet de mesurer la température aux différents niveaux du transformateur.

❖ Crochets de levage : Il permet la manutention et le décuvage.



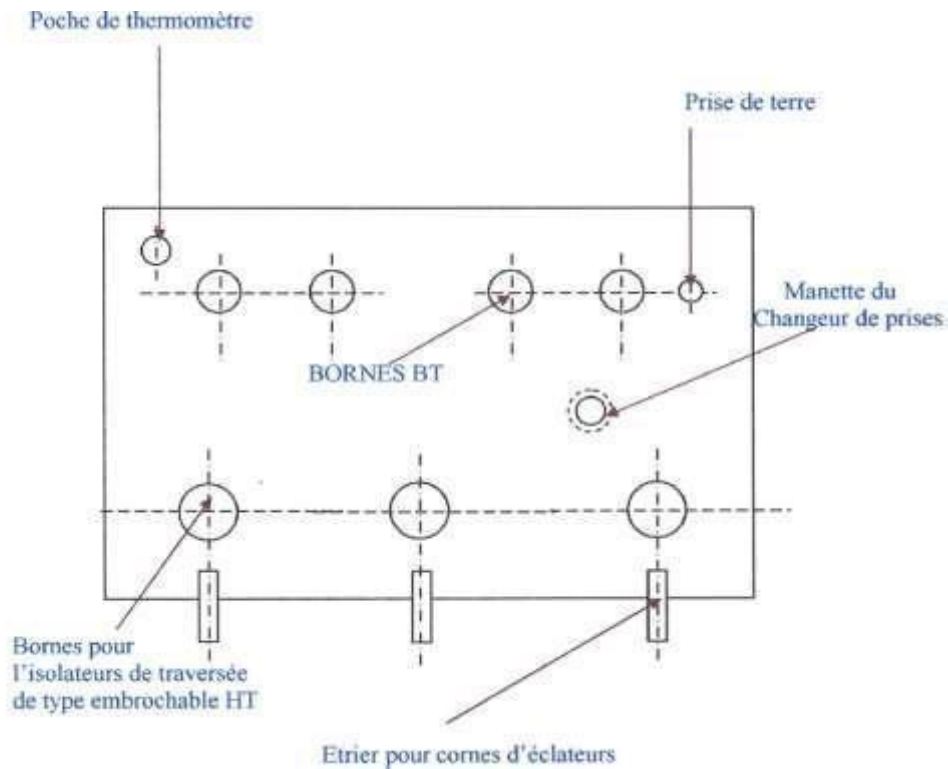


Fig 1.6 Vue d'ensemble de couvercle [3].

**I.4. Choix des couplages [3].**

Les enroulements se couplent au choix en étoile (Y) ou en triangle (Δ) ou en zigzag.

**I.4.1. Connexion étoile**

Dans la connexion étoile chaque enroulement de phase d'un transformateur triphasé est connecté à un point commun (point neutre) qui peut être mis ou non à la terre. L'autre extrémité étant reliée à la borne de ligne correspondante. La tension aux bornes des bobines est la tension entre phases divisée par  $\sqrt{3}$ , Le courant traversant les bobines est le courant de ligne. Elle est représentée par la lettre Y.

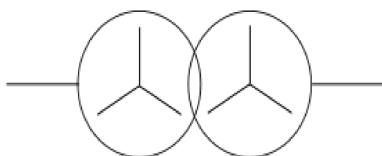


Fig I.7 Symbole d'un transformateur Etoile-Etoile

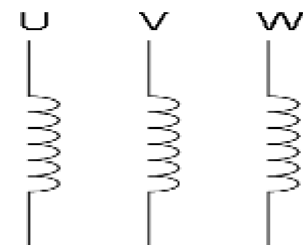
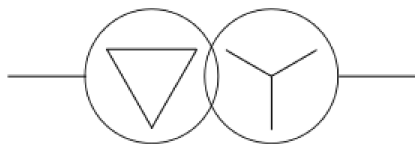


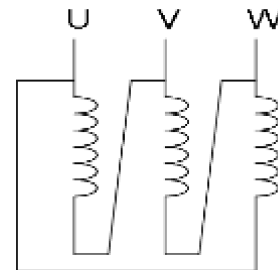
Fig I.8 Schéma électrique de la connexion étoile

**I.4.2. Connexion triangle**

Dans la connexion triangle, la connexion des enroulements de phase d'un transformateur triphasé est effectuée de manière à réaliser un circuit fermé. La tension aux bornes des bobines est la tension entre phases. Le courant traversant les bobines est le courant de ligne divisé par  $\sqrt{3}$ . Elle est représentée par la lettre D ou  $\Delta$ . Il ne peut être mis à la terre.



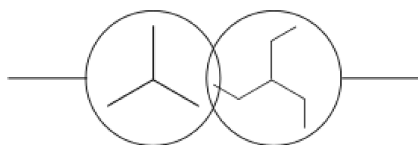
**Fig I.9** Symbole d'un transformateur Triangle – Etoile



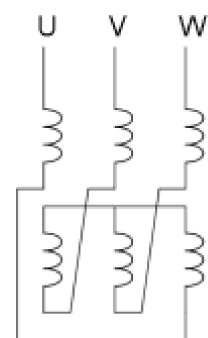
**Fig I.10** Schéma électrique de la connexion triangle

**I.4.3. Connexions zigzag**

Connexion des enroulements consistant en deux sections d'enroulement, la première section étant connectée en étoile et la seconde en série entre la première section et les bornes de ligne : les deux sections sont disposées de telle sorte que chaque phase de la deuxième section soit enroulée sur une colonne du transformateur différente de celle de la première section à laquelle elle est connectée. Elle est représentée par la lettre Z. Elle combine certains des avantages des connexions étoiles et triangle. Ainsi, elle peut être mise à la terre de la même manière que les connexion étoiles.



**Fig I.11** Symbole d'un transformateur Etoile-Zigzag



**Fig I.12** Schéma de connexion zigzag

## I.5 Caractéristiques industrielles d'un transformateur [1], [2].

### I.5.1 Paramètres techniques

#### I.5.1.1 Puissance nominale

C'est la valeur conventionnelle de la puissance apparente. Elle peut être utilisée lors du fonctionnement du transformateur en régime nominale, elle est donnée en KVA ou MVA.

#### I.5.1.2 Tension nominale

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

#### I.5.1.3 Courant nominal

C'est le courant pour lequel seront définies et garanties les caractéristiques dues à la charge (pertes dues à la charge, la tension de court-circuit  $U_{CC}$ )

#### I.5.1.4 Tension de court-circuit ( $U_{CC}$ )

On appelle tension de court-circuit, la tension réduite qu'il faut appliquer au primaire, le secondaire étant en court-circuit, pour que circule le courant nominal au primaire.

En valeur relative, la tension de court-circuit est comprise entre 4 et 15% de la tension nominale. La tension de court-circuit constitue l'une des valeurs les plus importantes du transformateur. Elle constitue une grandeur essentielle pour déterminer la possibilité de la mise en marche en parallèle de plusieurs transformateurs.

#### I.5.1.5 Pertes à vide

Ce sont des pertes actives, exprimées en [kW], dissipées dans le transformateur lorsqu'il est alimenté sous sa tension nominale mais ne débite pas sur aucune charge. Elles sont données par la somme des pertes principales et des pertes supplémentaires :

- ❖ **Pertes principales dans le fer du noyau** : elles comprennent les pertes par hystérésis et par courant de Foucault.
- ❖ **Pertes supplémentaires**: ce sont les pertes dans les isolateurs ainsi que les pertes dans les différentes pièces de serrage et joints du circuit magnétique.

### I.5.1.6 Pertes par effet joule

Elles sont obtenues à partir de l'essai en court-circuit. Pendant cet essai, l'induction maximale est très petite dans le noyau, il ne résulte que les pertes fer qui sont négligeables et la puissance absorbée est égale aux pertes dans le cuivre de l'enroulement. Le passage du courant dans les enroulements provoque des pertes d'énergies proportionnelles à la résistivité et au volume du conducteur, ainsi qu'au carré de la densité du courant :

$$P_j = R \cdot I^2, \quad R \text{ c'est la résistance des enroulements.}$$

Ces pertes se manifestent sous forme de dégagement de chaleur.

### I.5.1.7 Rapport de transformation

C'est le rapport de la tension secondaire à vide par la tension nominale primaire.

$$m = \frac{U_{20}}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (\text{I.7})$$

Le rapport de transformation dépend aussi du mode de couplage.

Où :  $N_1$ : Nombre de spires au primaire.

$N_2$ : Nombre de spires au secondaire.

## I.5.2 paramètres d'exploitation

### I.5.2.1 Chute de tension

La chute de tension est la différence numérique des tensions secondaires à vide et en charge, elle dépend généralement de la valeur et de la nature de la charge et elle est exprimée en volts.

Pour une charge nominale, l'expression analytique de la variation de la tension est donnée par :

$$\Delta U\% = \alpha \cdot (U_{cc_a} \cdot \cos \theta_2 + U_{cc_r} \cdot \sin \theta_2) + \frac{\alpha^2}{200} \cdot (U_{cc_r} \cdot \cos \theta_2 - U_{cc_a} \cdot \sin \theta_2)^2 \quad (\text{I.8})$$

$$\alpha^2 = \frac{P_2}{P_{2N}} \quad (\text{I.9})$$

$U_{cc_a}$  : La composante active de la tension de court-circuit.

$U_{cc_r}$  : La composante réactive de la tension de court-circuit.

$\theta_2$  : Le déphasage secondaire.

$\alpha$  : Le coefficient de charge.

$P_2$  : La puissance active pour une charge donnée.

$P_{2N}$  : La Puissance active nominale.

Pour une puissance apparente inférieure à 1600 KVA, on néglige le dernier terme et on aura :

$$\Delta U\% = \alpha \cdot (U_{cc_a} \cdot \cos \theta_2 + U_{cc_r} \cdot \sin \theta_2) \quad (I.10)$$

### 1.5.2.2 Le rendement

Le transformateur est un appareil d'excellent rendement. Cela tient d'une part à l'absence de toutes pertes mécanique, et d'autre part au fait que le circuit magnétique étant très peu réloquent. Le rendement croit quand la puissance croit, il est exprimé par le rapport de la puissance au secondaire sur la puissance au primaire.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (I.11)$$

$P_1$  : puissance fournie au primaire du transformateur,

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \theta_1 \quad (I.12)$$

$P_2$  : puissance délivrée par le secondaire du transformateur,

$$P_2 = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \theta_2 \quad (I.13)$$

$$\text{Avec : } P_1 = P_2 + P_0 + P_{cu} \quad (I.14)$$

$P_0$  : pertes fer dans le circuit magnétique.

$P_{cu}$  : Pertes des conducteurs pour un facteur de charge donné.

$$\eta = \frac{P_1 - (P_0 + P_{cu})}{P_1} = 1 - \frac{P_0 + P_{cu}}{P_2 + P_0 + P_{cu}}$$

$$P_{cu} = 3 \cdot R \cdot I_2^2 \quad (I.15)$$

$I_2$  : Courant secondaire pour une charge donnée.

$R$  : La résistance du transformateur ramené au secondaire.

**On pose :**

$$\alpha_0 = \frac{I_2}{I_{cc}} \quad \text{avec } I_{cc} = I_{2n}$$

Ou  $\alpha$  : Facteur de charge.

**Donc :**

$$P_{cu} = \alpha \cdot P_{cc}$$

$$P_2 = S \cdot \cos \theta_2 = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \theta_2 \quad (I.16)$$

**On peut écrire :**

$$P_2 = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_{cc} \cdot \frac{I_2}{I_{cc}} \cdot \cos \theta_2 = \alpha S_n \cos \theta_2 \quad (I.17)$$

Ce qui nous donne :

$$\tau\% = \left(1 - \frac{P_0 + \alpha^2 \cdot P_{CC}}{\alpha \cdot S_n \cdot \cos \theta_2 + P_0 + \alpha^2 P_{CC}}\right) \cdot 100 \quad (\text{I.18})$$

Pour un  $\cos \theta_2$  constant et pour un rendement maximal, le facteur de charge est obtenu par l'annulation de la dérivée de la fonction du rendement ci-dessus.

$$\text{Finalement, on obtient : } \alpha = \sqrt{\frac{P_0}{P_{CC}}} \quad (\text{I.19})$$

# **Chapitre 2**

## **Calculs électromagnétiques**

## II. Introduction

Le calcul électromagnétique nécessite en premier lieu un calcul préliminaire permettant de déterminer, à partir du cahier des charges, les dimensions principales d'un transformateur puis un calcul définitif qui, à partir des résultats précédents dans le premier calcul permet de dimensionner les enroulements, d'établir toutes les caractéristiques électromagnétiques et de les comparer à celles du cahier des charges.

### II.1 Calcul préliminaire des dimensions principales

Nous commençons par un calcul préliminaire en déterminant les grandeurs suivantes :

1. Le diamètre de la colonne **D** (voir figure II.1).
2. Le diamètre du canal de fuite **d<sub>12</sub>** (voir figure II.1).
3. La hauteur des enroulements **h<sub>b</sub>**.

#### II.1.1 le diamètre de la colonne

Pour notre cas le diamètre D est une donnée l'ENEL. D= 194 mm.

#### II.1.2 Le diamètre du canal de fuite d<sub>12</sub>

Le diamètre d<sub>12</sub> est égale à :

$$d_{12} = D + 2a_{20} + 2a_2 + a_{12} \quad (\text{II.1})$$

a<sub>20</sub> : La distance entre la colonne et l'enroulement basse tension, elle est donnée en fonction de la tension secondaire nominale selon le constructeur. (Voir figure II.1)

D'après les normes de l'ENEL : a<sub>20</sub>= 4mm.

a<sub>2</sub> : épaisseur de l'enroulement secondaire. (Voir figure II.1)

a<sub>12</sub> : la largeur du canal de fuite. (Voir figure II.1)

#### ➤ Calcul de a<sub>2</sub> (épaisseur de l'enroulement secondaire)

La valeur de a<sub>2</sub> est en fonction de Ka<sub>2</sub> et de la puissance apparente par colonne Sc.

$$a_2 = Ka_2 \cdot \sqrt[4]{S_c} \quad (\text{II.2})$$

Avec Ka<sub>2</sub> est un coefficient qui varie en fonction de la tension nominale U<sub>1n</sub>, il est déterminé selon le tableau (II.1).



Tab II.1 les valeurs du coefficient  $Ka_2$  [4].

$U_{1n}(KV)$	← 35	← 110
$Ka_2$	0,55	0,45

Donc pour notre cas  $U_{1n}=10kv$  alors  $Ka_2= 0,55$ .

❖ **Calcul de la puissance apparente par colonne**

$$S_c = \frac{S_n}{m_c} \tag{II.3}$$

$S_n$  : c'est la puissance nominale d'un transformateur ( $S_n = 630 Kva$  ).

$m_c$  : nombre de colonne ( $m_c = 3$  pour un transformateur triphasé).

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

Alors :  $S_c = 210 kVA$

Donc d'après (II.2) on trouve :

$$a_2 = 0,55 \times \sqrt[4]{210} = 2,093 \text{ cm}$$

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

➤ **Déterminer la valeur de  $a_{12}$  :**

La largeur du canal de fuite  $a_{12}$  est en fonction de la tension la plus élevée du transformateur et de la tension d'essai. Pour notre cas c'est la tension au primaire. Elle est déterminée du tableau (II.2)

Tab II.2 La largeur du canal pour les transformateurs immergés dans l'huile [4].

$U_{1n}(KV)$	03	08	10	15	20	35	60	170	220
$U (KV)_{CEI}$	3,6	7,2	12	17,5	24	36	72,5	123	245
$U_{essai} (KV)$	16	22	28	38	50	70	140	230	460
$a_{12}( \text{cm})$	0,6 à 1		0,8 à 1,2	1 à 1,5	1,2 à 1,8	2,1- 2,7	-	6 à 8	13 à 22

Dans notre cas on prend  $a_{12} = 0,8 \text{ cm} = 8\text{mm}$

Donc d'après (II.1) le diamètre  $d_{12}$  est égale à :

$$d_{12} = 194 + (2 \times 21) + (2 \times 4) + 8 = 252 \text{ mm}$$

$$d_{12} = 252 \text{ mm}$$

**II.1.3 La hauteur des enroulements  $h_b$ .**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$h_b = \pi \cdot \frac{d_{12}}{\beta} \tag{II.4}$$

Où

$\beta$  Coefficient de SVELTESSE est déterminé du tab (II.3)

Tab II.3 Les valeurs du  $\beta$  [4].

<b>Se [kVA]</b>	3 à 2000		2000 à 3000	
<b>Un [KV]</b>	6 à 10	35	110	
<b><math>\beta</math> Aluminium</b>	1.8 à 1.15		1.77 à 1.49	
<b><math>\beta</math> Cuivre</b>	3.4 à 1.75	3 à 1.8	1.8 à 1.3	2 à 1.5

Pour notre cas  $\beta$  est compris entre (1,15 et 1,8)

Pour un calcul préliminaire, on prend :  $\beta= 1,5$

D'après (II.4) on trouve  $h_b$  comme suit :

$$h_b = 3,14 \times \frac{252}{1,5} = 527.788 \text{ mm}$$

$$h_b = 528 \text{ mm}$$

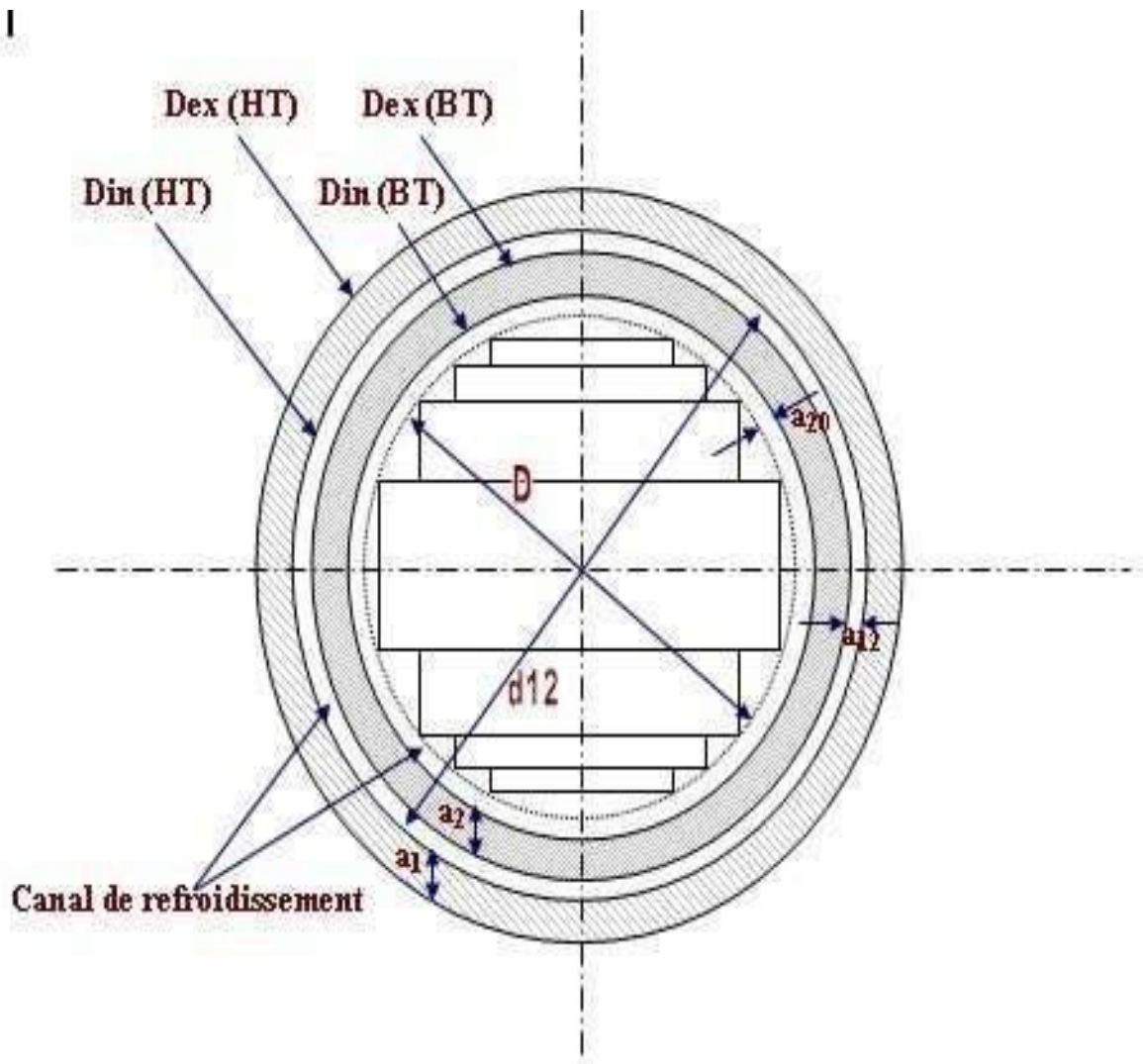


Fig II.1 Coupe générale de la colonne [2].

✚ Composante réactive de la tension de court-circuit  $U_{ccr}$

La tension de court-circuit est la tension avec laquelle on alimente le primaire de sorte que le secondaire étant en court-circuit débite un courant d'intensité égal au courant nominal.

La tension de court-circuit  $U_{cc}$  a deux composantes :

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

Tels que : 
$$U_{cc}\% = \sqrt{U_{cca}^2\% + U_{ccr}^2\%} \tag{II.5}$$

$$U_{ccr}\% = \sqrt{U_{cc}^2\% - U_{cca}^2\%} \tag{II.6}$$

Et : 
$$U_{cca}\% = \frac{P_{cc}}{S_n} \cdot 100 \tag{II.7}$$

Avec :  $U_{cc}\% = 6\%$  (Cahier des Charges).

$P_{cc}$  : Pertes en court-circuit, ( $P_{cc}=6.5\%$  <cahier des charges> ).

Donc :

$$U_{cc_a}\% = \frac{6,5}{630} \times 100 = 1,0317 V$$

$$U_{cc_a}\% = 1,032 V$$

Et d'après (II.6) on aura :

$$U_{cc_r}\% = \sqrt{6^2 - 1,032^2} = 5,9105 v$$

$$U_{cc_r}\% = 5,911 V$$

## II.2 Calcul des enroulements

### II.2.1 Détermination des paramètres de l'enroulement basse tension

#### II.2.1.1 Nombre de spires basse Tension $w_2$

Le nombre de spires  $W_2$  est calculé comme suit :

$$w_2 = \frac{U_{2n}}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot f \cdot B \cdot S_{fer}} \quad (II.8)$$

B: induction magnétique, pour ce transformateur :

$$B=1,74T$$

$S_{fer}$  : Section de fer de la colonne,

$$S_{fer}=259.6cm^2$$

D'où :

$$W_2 = \frac{400}{\sqrt{3} \times 4,44 \times 50 \times 1,74 \times 259,6 \times 10^{-4}} = 23,03 \text{ spires}$$

$$W_2 = 23 \text{ spires}$$

$Sp_{co}$  : le nombre de spires/conducteur,  $Sp_{co} = 11,5$

Recalculons maintenant le champ magnétique, on l'appelle  $B_r$  :

$$B_r = \frac{U_{2n}}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot S_{fer}} \quad (II.9)$$

$$B_r = \frac{400}{\sqrt{3} \times 4,44 \times 50 \times 23 \times 259,6 \times 10^{-4}} = 1,742 T$$

$$B_r = 1,742 T$$

#### II.2.1.2 Tension aux bornes d'une spire

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$U_{sp} = 4,44 \cdot f \cdot B_r \cdot S_{fer} \quad (II.10)$$

D'où :

$$U_{sp} = 4,44 \times 50 \times 1,742 \times 259,6 \times 10^{-4} = 10,0393 V$$

$$U_{sp} = 10,04 V$$

**II.2.1.3 Choix de la section  $S_2$  des conducteurs Basse Tension**

la section  $S_2$  est en fonction du courant nominal  $I_{S_2}$  et de la densité moyenne du courant  $J_m$ .

$$S_2 = \frac{I_{S_2}}{J_m} \tag{II.11}$$

➤ **Calcul du courant nominal simple  $I_{S_2}$**

$$I_{S_2} = \frac{S_c}{U_{S_2}} \tag{II.12}$$

❖ **Calcul de la tension nominal simple  $U_{S_2}$**

Elle dépend du mode de couplage, l'enroulement secondaire étant couplé en étoile, donc on aura :

$$U_{S_2} = \frac{U_{2n}}{\sqrt{3}} \tag{II.13}$$

$$U_{S_2} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230,94 \text{ V}$$

$$U_{S_2} = 230,94 \text{ V}$$

Donc d'après (II.12) :

$$I_{S_2} = \frac{210}{230,94} = 909,327 \text{ A}$$

$$I_{S_2} = 909,327 \text{ A}$$

➤ **Calcul de la densité moyenne du courant  $J_m$**

Elle est donnée par la relation suivante :

$$J_m = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \rho_T \cdot K_{pcc}} \cdot \frac{P_{cc}}{S_n} \cdot \frac{U_{sp}}{d_{12}} \tag{II.14}$$

$\rho_T$ : Résistivité des conducteurs utilisés pour le bobinage, elle est donnée par la formule suivante :

$$\rho_T = \rho_{20^\circ} \cdot [(1 + \alpha \cdot (T - 20))] \tag{II.15}$$

La température moyenne de fonctionnement étant  $T = 75^\circ\text{C}$ .

$\rho_{20^\circ}$  : Résistivité des conducteurs utilisés pour le bobinage à  $20^\circ(\Omega \cdot \text{m})$ .

$$\rho_{20^\circ} = 0,0263 \cdot 10^{-6}$$

$\alpha$  : Coefficient de température ( $^\circ\text{C}^{-1}$ )

$$\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3}$$

Donc d'après (II.15) :

$$\rho_{75} = 0,0263 \times 10^{-6} \times \left[ \left( 1 + \left( 4,3 \times 10^{-3} \right) \times (75 - 20) \right) \right] \times 10^6 = 0,0325 \frac{\Omega \cdot \text{m}}{\text{mm}^2}$$

$$\rho_{75} = 0,033 \frac{\Omega \cdot \text{m}}{\text{mm}^2}$$

$K_{pcc}$  : Facteur tenant compte des pertes supplémentaires, il est en fonction de la puissance apparente  $S_n$  du transformateur. On Peut le déterminer d'après le Tab (II.4) .

Tab II.4 les valeurs de  $K_{pcc}$  [4].

<b>Sn(KVA)</b>	30	180	600	1000	1600	2000	2500	4000
<b><math>K_{pcc}</math></b>	1.020	1.025	1,050	1,060	1,070	1,075	1,080	1,090

Pour une puissance de 630 kVA, on prend :  $K_{pcc} = 1,040$  .

$P_{cc}$  : Pertes en court-circuit en [Kw],  $P_{cc} = 6,5$  kW

Donc, d'après (II.14) :

$$J_m = \frac{1}{2 \times 3,14 \times 0,033 \times 1,040} \times \frac{6,5 \times 10^3}{630 \times 10^3} \times \frac{10,041}{252 \times 10^{-3}} = 1,9357 \text{ A/mm}^2$$

$$J_m = 1,936 \text{ A/mm}^2$$

La densité du courant influe sur la section des conducteurs et sur les pertes joules entrainant l'échauffement de ces derniers, plus la densité est grande, plus les pertes joules augmentent et plus la section des conducteurs est faible.

➤ **Calcul de la section  $S_2$**

Finalement, d'après (II.11)  $S_2$  est égale a :

$$S_2 = \frac{I_{s2}}{J_m} = \frac{909,327}{1,936} = 469,69 \text{ mm}^2$$

$$S_2 = 469,69 \text{ mm}^2$$

Le tableau II.5 nous donne les valeurs normalisées des sections des conducteurs en aluminium de l'enroulement basse tension, leurs dimensions ainsi que leurs isolations.

Selon ce tableau le choix du fils : ( **2 fils de 12/7 et un fils de 14/7** )

$S_{12} = 83,1 \text{ mm}^2$  qui a pour  $b_{12} = 12\text{mm}$ ,  $a_{12} = 7\text{mm}$  et une isolation de **0,5mm**

$S_{22} = 97,1 \text{ mm}^2$  qui a pour  $b_{22} = 14\text{mm}$ ,  $a_{22} = 7\text{mm}$  et une isolation de **0,5mm**

$$J_{m2} = \frac{I_{s2}}{(2 \cdot S_{12}) + (S_{22})} \tag{II.16}$$

$$J_{m2} = \frac{909,327}{(2 \times 83,1) + (97,1)} = 3,454 \text{ A/mm}^2$$

$$J_{m2} = 3,454 \text{ A/mm}^2$$

➤ **Dimensions des conducteurs méplats en Aluminium.**

a : Epaisseur du conducteur en mm.

b : largeur du conducteur en mm.

Une isolation de 0,5 mm.

Tab II.5 les valeurs normalisées des sections des conducteurs en aluminium [2].

a \ b	5.5	6	6.5	7	7.5	8	9	10	11	12	13	14	15	16	18
5.5	29.5														
6	32.1	35.1													
6.5	34.9	38.1	41.4												
7	37.6	41.1	44.6	48.1											
7.5	40.4	44.1	47.9	51.6	55.4										
8	43.1	47.1	51.1	55.1	59.1	63.1									
9	48.6	53.1	57.6	62.1	66.6	71.1	80.1								
10	54.1	59.1	64.1	69.1	74.1	79.1	89.1	99.1							
11	59.6	65.1	70.6	76.1	81.6	87.1	98.1	109	119						
12	65.1	71.1	77.1	83.1	89.1	95.1	107	119	130	142					
13	70.6	77.1	83.6	90.1	96.6	103	116	129	141	154	167				
14	76.1	83.1	90.1	97.1	104	111	125	139	152	166	180	194			
15	81.6	89.1	96.6	104	112	119	134	149	163	178	193	208	223		
16	87.1	95.1	103	111	119	127	143	159	174	190	206	222	238	254	
18	98.1	107	116	125	134	143	161	179	196	214	232	250	268	286	332
20	109	119	129	139	149	159	179	199	218	238	258	278	298	318	358
22	120	131	142	136	164	175	197	219	240	262	284	306	328	350	394
25	137	149	162	174	187	199	224	249	273	298	323	348	373	398	448
28	153	167	181	195	209	223	251	279	306	334	362	390	418	446	502
30	164	179	194	209	224	239	269	299	328	358	388	418	448	478	538

## II.2.2 Détermination des paramètres de l'enroulement haute Tension

### II.2.2.1 Calcul du nombre de spire HT ( $w_1$ )

Il est donné par la relation suivante :

$$W_1 = \sqrt{3} \cdot \frac{U_{1n}}{U_{2n}} \cdot W_2 \quad (\text{II.17})$$

Avec :  $U_{1n} = 10000$  V (tension nominale composée au primaire).

$$W_1 = \sqrt{3} \cdot \frac{10000}{400} \cdot 23 = 995,93 \text{ spires}$$

$$W_1 = 996 \text{ spires}$$

### II.2.2.2 Calcul de la section des conducteurs HT ( $S_1$ )

$$S_1 = \frac{I_{s1}}{J_m} \quad (\text{II.18})$$

$I_{s1}$ : Courant simple au primaire

#### ➤ Calcul de $I_{s1}$

$$I_{s1} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{n1}} \quad (\text{II.19})$$

$$I_{s1} = \frac{630 \times 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10 \times 10^3} = 36,373 \text{ A}$$

$$I_{s1} = 36,373 \text{ A}$$

Finalement, d'après (II.18)  $S_1$  est égale à :

$$S_1 = \frac{I_{s1}}{J_m} = \frac{36,373}{1,936} = 18,788 \text{ mm}^2$$

$$S_1 = 18,788 \text{ mm}^2$$

### II.2.2.3 Calcul du diamètre des conducteurs HT ( $d$ )

$$d_1 = \sqrt{\frac{S_1 \cdot 4}{\pi}} \quad (\text{II.20})$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{18,788 \times 4}{\pi}} = 4,891 \text{ mm}$$

$$d_1 = 4,891 \text{ mm}$$

D'après l'électro industrie d'AZAZGA le diamètre normalisé utilisé est :

$$d_{1n} = 3,15 \text{ mm (sans isolation)}$$

Le diamètre avec isolation est :

$$d_{iso} = 3.279 \text{ mm}$$



Recalculons la section  $S_1$  :

$$S_1 = \pi \frac{d_{1n}^2}{4} \quad (\text{II.21})$$

$$S_1 = \pi \frac{(3,15)^2}{4} = 7,793 \text{ mm}^2$$

$$S_1 = 7,793 \text{ mm}^2$$

➤ **Calcul de la densité moyenne  $J_1$**

$$J_1 = \frac{I_{S_1}}{S_1 \cdot \sqrt{3}} \quad (\text{II.22})$$

$$J_1 = \frac{36,373}{7,793 \times \sqrt{3}}$$

$$J_1 = 2,695 \text{ A/mm}^2$$

## II.2.3 Calcul des dimensions

### II.2.3.1 Basse tension

❖ **Calcul de la hauteur magnétique basse tension ( $h_m$ )**

Elle est donnée par la relation suivante :

$$h_m = [ 2 \cdot (b_{12} + iso_{22}) + (b_{22} + iso_{22}) ] \cdot Sp_{co} \quad (\text{II.23})$$

$iso_{22}$  : l'épaisseur de l'isolation (0,5mm)

$$h_m = [ 2 \times (12 + 0,5) + (14 + 0,5) ] \times 11,5 = 454,25 \text{ mm}$$

$$h_m = 454 \text{ mm}$$

❖ **la hauteur de la bobine ( $h_2$ )**

$$h_2 = [ 2 \cdot (b_{12} + iso_{22}) + (b_{22} + iso_{22}) ] \cdot (Sp_{co} + 1) \quad (\text{II.24})$$

$$h_2 = [ 2 \times (12 + 0,5) + (14 + 0,5) ] \times (11,5 + 1) = 493,75 \text{ mm}$$

$$h_2 = 494 \text{ mm}$$

### II.2.3.2 Haute tension

❖ **Calcul de la hauteur magnétique haute tension  $H_m$**

$$H_m = h_m - k$$

Tels que :  $k = 0$  à 16mm.

Dans notre cas  $k = 8$ mm.

$H_m = h_m - 8$ , en remplaçant  $h_m$  avec sa valeur on trouve :

$$H_m = 446\text{mm}$$

❖ **La hauteur de la bobine ( $H_b$ )**

La hauteur de la bobine HT égale à la hauteur magnétique  $H_m$  :

$$H_m = H_b$$

$$H_b = 446\text{mm}$$

❖ **Calcul du nombre de couches HT ( $N_c$ )**

$$N_c = \frac{d_{iso} \cdot (W1 + 5\%)}{H_m} \tag{II.25}$$

$$N_c = \frac{3,279 \cdot (996 + 5\%)}{446} = 7,323$$

$$N_c = 8 \text{ couches}$$

❖ **Calcul de la hauteur du montage des bobines ( $H_M$ )**

La hauteur du montage de la bobine Haute Tension est égale à la hauteur du montage de la bobine basse tension.

$$\text{Elle est égale à : } H_M = H_b + 2d \tag{II.26}$$

$d$  : c'est la largeur des calles de serrage qu'il faut mettre aux extrémités du bobinage pour le serrer.

$$\text{D'après L'ENEL : } d = 30\text{mm}$$

Donc d'après (II.26) :

$$H_M = 446 + (2 \times 30)$$

$$H_M = 506\text{mm} \quad (\text{voir figure II.3}).$$

❖ **Répartition des spires sur les couches  $N_{2d}$**

Pour la classe de 10 KV, on procède à cette disposition des spires :

$$N_{2d} = \frac{H_M - 2d}{d_{iso}} \tag{II.27}$$

$$d_{iso} : \text{ le diamètre avec isolation : } \quad d_{iso} = 3.279 \text{ mm}$$

Soit :

$$d_{11} = 30\text{mm} \quad d_{21} = 30\text{mm} \quad d_{31} = 20\text{mm}$$

Cela nous donne :

$$N_{2d} = \frac{H_M - 2d}{d_{iso}} = \frac{506 - 60}{3,279} = 136,017 \quad N_{2d} = 136,017$$

$$N_{11} = \frac{H_M - 2d_{11}}{d_{iso}} = \frac{506 - 60}{3,279} = 136,017 \quad N_{11} = 136,017 \quad (1^{\text{ere}} \text{ couche})$$

$$N_{21} = \frac{H_M - 2d_{21}}{d_{iso}} = \frac{506-60}{3,279} = 136,017 \quad N_{21} = 136,017 \quad (2^{eme} \text{ couche})$$

$$N_{31} = \frac{H_M - 2d_{31}}{d_{iso}} = \frac{506-40}{3,279} = 142,116 \quad N_{31} = 142,116 \quad (3eme \text{ couche})$$

le nombre de spires de la dernière couche  $N_{dc}$  est déduit par la relation suivante :

$$N_{dc} = (w1 + 0,05) - Nsp_c \quad (II.28)$$

$$\text{Avec : } Nsp_c = N_{11} + N_{21} + N_{31} + (Nc - 4).N_{2d} = 958,219 \text{ spires} \quad (II.25)$$

**Donc :**  $N_{dc} = 38$  spires

### I.3 Dimensionnement radial des enroulements et du circuit magnétique

#### II.3.1 Le diamètre intérieur de la bobine basse tension ( $Di_2$ )

$$Di_2 = D + 2a_{20} \quad (II.26)$$

$a_{20}$  : l'intervalle entre la colonne et le coté intérieur de la bobine BT.

$a_{20} = 4\text{mm}$  (il est donné par le constructeur l'ENEL)

$$\text{Donc : } Di_2 = 194 + 8 = 202 \text{ mm}$$

$$Di_2 = 202 \text{ mm}$$

#### II.3.2 Diamètre extérieur de la bobine basse Tension ( $Dex_2$ )

$$Dex_2 = Di_2 + 2a_2 \quad (II.27)$$

##### ❖ Calcul définitif de l'épaisseur de l'enroulement secondaire ( $a_2$ )

$$a_2 = (a_{22} + 0,5). 2 + C_2 \quad (II.28)$$

$C_2$  : épaisseur du canal de refroidissement. ( $C_2 = 5\text{mm}$  d'après L'ENEL).

Alors :

$$a_2 = ((7 + 0,5) \times 2) + 5 = 20 \text{ mm}$$

$$a_2 = 20 \text{ mm}$$

Donc d'après (II.27) :

$$Dex_2 = 202 + (2 \times 20)$$

$$Dex_2 = 242\text{mm} \quad (\text{voir figure II.3}).$$

#### II.3.3 Diamètre intérieur de la bobine Haute Tension ( $Di_1$ )

$$Di_1 = Dex_2 + a_{12} \quad (II.29)$$

$$Di_1 = 242 + 8$$

$$Di_1 = 250 \text{ mm}$$

**II.3.4 Diamètre extérieur de la bobine Haute Tension (Dex<sub>1</sub>)**

$$D_{ex_1} = D_{i_1} + 2A_1 \quad (II.30)$$

**❖ Calcul définitif de l'épaisseur de l'enroulement primaire A<sub>1</sub>**

$$A_1 = [0,2(N_c - 1) + d_{iso} \cdot N_c + C_1] \quad (II.31)$$

C<sub>1</sub> : canal de refroidissement, C<sub>1</sub>= 4+4mm.

L'isolation entre couches en papier est : 0,2mm.

Donc :

$$A_1 = [0,2(7,32 - 1) + (3,279 \times 7,32) + 8] = 33,277 \text{ mm}$$

$$A_1 = 33 \text{ mm}$$

Alors, d'après (II.30) :

$$D_{ex_1} = 250 + (2 \times 33) = 316 \text{ mm}$$

$$D_{ex_1} = 316 \text{ mm} \quad (\text{voir figure II.3}).$$

**II.3.5 Hauteur de la fenêtre Hc**

$$H_c = H_M + (D_{c_s} + D_{c_i}) \quad (II.32)$$

D<sub>c<sub>s</sub></sub> : Distance entre la bobine et la culasse supérieur, D<sub>c<sub>s</sub></sub>=7mm.

D<sub>c<sub>i</sub></sub> : Distance entre la bobine et la culasse inférieur, D<sub>c<sub>i</sub></sub>=7mm

D<sub>c<sub>i</sub></sub> et D<sub>c<sub>s</sub></sub> : elles sont données par le constructeur.

$$\text{Implique que :} \quad H_c = 506 + (7 + 7)$$

$$H_c = 520 \text{ mm} \quad (\text{Voir figure II.3}).$$

**II.3.6 La distance Entre l'axe et la colonne Ec**

$$E_c = D_{ex_1} + a_{11} \quad (II.33)$$

a<sub>11</sub> : Distance latérale entre deux phases haute tension voisines, elle est en fonction de la tension composée au primaire

$$a_{11} = 17 \text{ mm}$$

$$\text{Donc : } E_c = 316 + 17$$

$$E_c = 333 \text{ mm} \quad (\text{voir figure II.3})$$

**II.3.7 Nombre de gradins**

Pour un diamètre de 194mm, la dimension correspondante des gradins (voir figure II.2) est donnée par l'ENEL, sont mentionnés par le Tableau (Tab II.6).

Tab II.6 la dimension correspondante des gradins donnés par l'ENEL [4].

Gradins de diamètre 121mm	
$B_{S_1} = 180 \text{ mm}$	$H_{S_1} = 72 \text{ mm}$
$B_{S_2} = 160 \text{ mm}$	$H_{S_2} = 110 \text{ mm}$
$B_{S_3} = 140 \text{ mm}$	$H_{S_3} = 134 \text{ mm}$
$B_{S_4} = 120 \text{ mm}$	$H_{S_4} = 152 \text{ mm}$
$B_{S_5} = 100 \text{ mm}$	$H_{S_5} = 166 \text{ mm}$
$B_{S_6} = 60 \text{ mm}$	$H_{S_6} = 184 \text{ mm}$

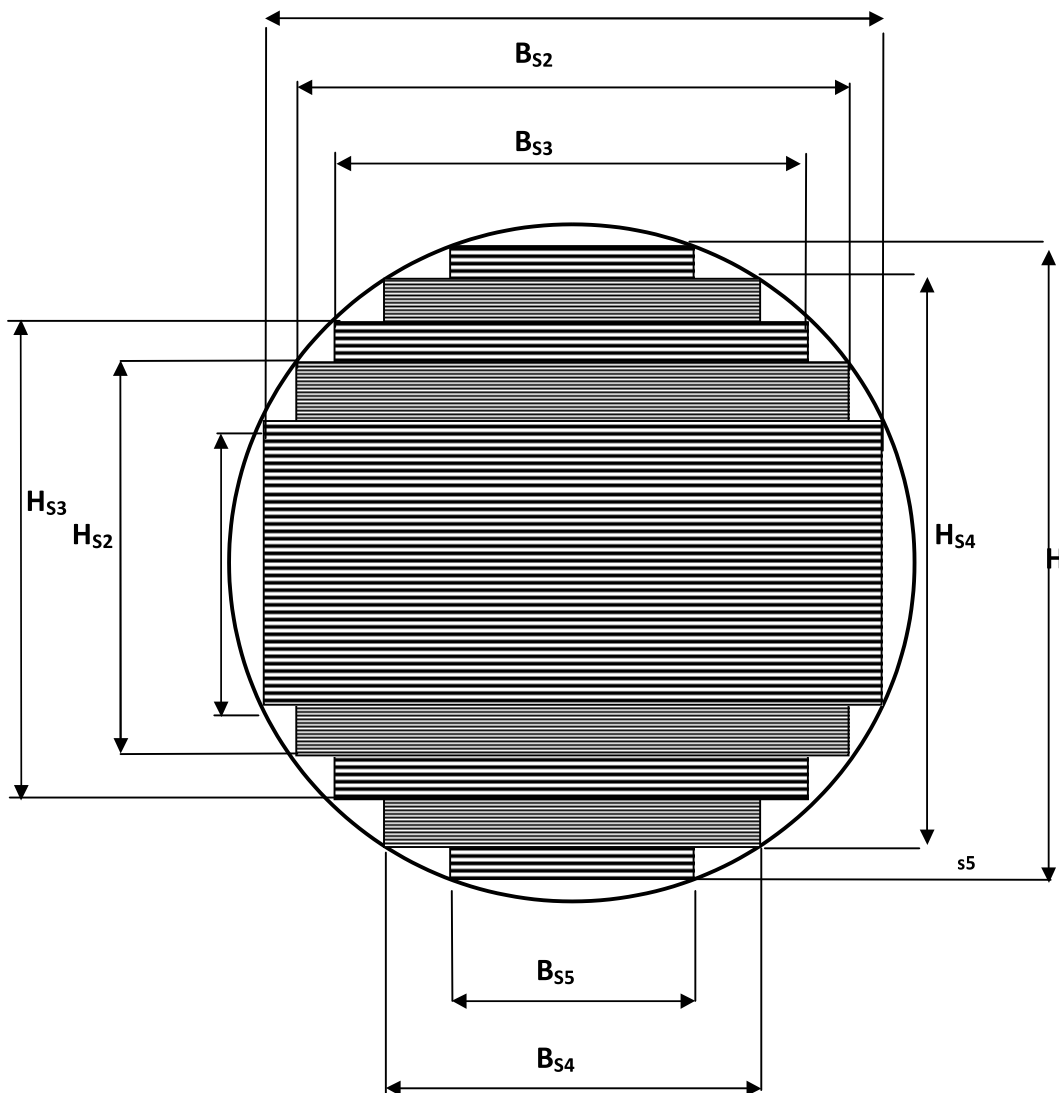


Fig II.2 Representation des gradins dans une colonne [3].

**II.3.8 Longueur de la fenêtre  $L_f$** 

$$L_f = E_c - B_{s1} \quad (\text{II.34})$$

$B_{s1}$  = largeur du premier gradin

$$L_f = 333 - 180$$

$$L_f = 153 \text{ mm} \quad (\text{voir figure II.3}).$$

**II.3.9 La hauteur du noyau  $H_n$** 

$$H_n = H_c + 2B_{s1} \quad (\text{II.35})$$

$$H_n = 520 + (2 \times 180)$$

$$H_n = 880 \text{ mm}$$

**II.3.10 La longueur du noyau  $L_n$** 

$$L_n = 2E_c + B_{s1} \quad (\text{II.36})$$

$$L_n = (2 \times 333) + 180$$

$$L_n = 846 \text{ mm} \quad (\text{voir figure II.3})$$

**II.3.11 Dimensionnement de la cale de progression**

On utilise une cale en papier dur à chaque extrémité des bobines BT

$$b1 = \frac{H_M - h_2}{2} \quad (\text{II.37})$$

$$b1 = \frac{506 - 494}{2} = 6 \text{ mm}$$

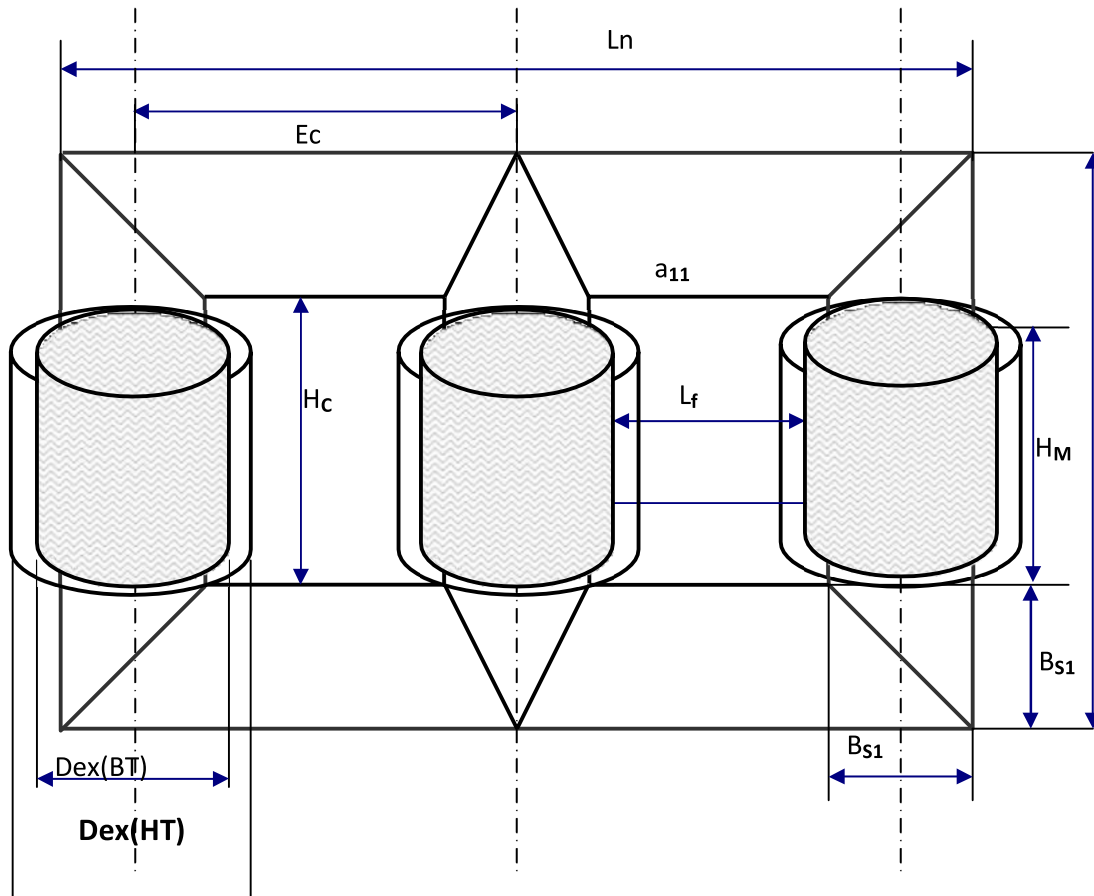


Fig II.3 Représentation des dimensions de la partie active

#### II.4 Recalcul des paramètres préliminaires précédents et vérification de la tension de court-circuit

- Recalcul de l'épaisseur du canal de fuite  $a_r$

$$a_r = a_{12} + A_1 \quad (\text{II.38})$$

Sachant que :

$$A_1 = 10.1,25. K. \sqrt[4]{Sc} \quad (\text{II.39})$$

Le coefficient  $k=0,7$

$$A_1 = 10 \times 1,25 \times 0,7 \times \sqrt[4]{210}$$

$$A_1 = 33,309 \text{ mm}$$

Donc, d'après (II.33) :

$$a_r = 8 + 33,309$$

$$a_r = 41,309 \text{ mm}$$

- **Recalcul du coefficient de sveltesse**

$$\beta_r = \pi \cdot \frac{d_{12}}{h_b} \quad (\text{II.40})$$

$$\beta_r = \pi \cdot \frac{252}{528}$$

$$\beta_r = 1,49$$

- **Recalcul du coefficient de ROGWSKI**

$$K_r = 1 - \frac{a_1 + a_2 + a_{12}}{2 \cdot \pi \cdot h_b} \quad (\text{II.41})$$

$$K_r = 1 - \frac{57,5 + 21 + 8}{2 \times \pi \times 528} = 0,974$$

$$k_r = 0,974$$

- **Recalcul de la composante réactive de la tension de court-circuit  $U_{ccr}$**

$$U_{ccr} = 10^{-4} \left[ \frac{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot a_r \cdot (2 \cdot w_1)^2 \cdot K_r \cdot I_{n1} \cdot \beta_r}{U_{n1}} \right] \cdot 100 \quad (\text{II.42})$$

$$U_{ccr} = 10^{-4} \times \left[ \frac{\sqrt{3} \times 2 \times \pi \times 50 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 41,309 \times (2 \times 996)^2 \times 0,974 \times 36,373 \times 1,49}{10000} \right] \times 100$$

$$U_{ccr} = 5,95 \text{ V}$$

- **Recalcul de  $U_{cc} \%$**

$$U_{cc} = \sqrt{U_{cc_a}^2 + U_{cc_r}^2} \quad (\text{II.43})$$

$$U_{cc} = \sqrt{1,03^2 + 5,95^2}$$

$$U_{cc} \% = 6,04 \text{ V}$$

## Conclusion

Dans ce chapitre le dimensionnement du transformateur est effectué sur la base d'un calcul électromagnétique. Ce calcul nous a permis de déterminer les dimensions géométrique du circuit magnétique, tels que les diamètres, les largeurs et les hauteurs des colonnes. Ensuite, le calcul du circuit électrique est fait, tels que la section du conducteur et le nombre de spires de la haute et basse tension. Ceci, en respectant les limites admissibles de l'induction magnétique et de la densité de courant respectivement.



# **Chapitre 3**

## **Calcul des pertes**

**III. Introduction**

Comme toutes les machines électriques, un transformateur est constitué du fer et d'aluminium. Il est le siège des pertes dans le fer et aussi dans l'aluminium sans avoir les pertes mécaniques.

**III.1 Pertes fer (à vide)  $P_0$**

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

$$P_0 = P_O + P_{S1} + P_{S2} \tag{III-1}$$

Avec :

**$P_0$**  : pertes dans le noyau.

**$P_{S1}$**  : pertes supplémentaires dans les coins.

**$P_{S2}$**  : pertes supplémentaire dans les colonnes et les culasses.

**III.1.1 Calcul des pertes dans le noyau  $P_0$**

$$P_0 = \delta_{1,5} \cdot K_{BP} \cdot G_n \tag{III-2}$$

**$\delta_{1,5}$**  : Pertes spécifiques pour une induction de 1,5 T  $\delta_{1,5} = 0,97 \text{ W/Kg}$

**$K_{BP}$**  : Coefficient correcteur des pertes spécifiques (Tab III.1) pour une induction différente de 1,5 T

Tab III.1 Coefficient correcteur des pertes spécifiques de  $K_{BP}$  [4].

<b>B (T)</b>	<b><math>K_{BP}</math></b>
$0,5 \leq BC \leq 1,1$	$0,413 B^2$
$1,1 \leq BC \leq 1,5$	$0,0758 e^{1,72BC}$
$1,5 \leq BC \leq 1,8$	$0,0536 e^{1,95BC}$
$1,8 \leq BC \leq 2$	$0,01126 e^{2,817Bc}$

Donc d'après Tab (3.1), pour une induction comprise entre (1,5T et 1,8) on a :

$K_{BP} = 0,0536 e^{1,95BC}$  , alors pour le transformateur a bobinage en AL :  $k_{BP} = 1,602$

Pour le poids du noyau  $G_n$  est calculé comme suit :

$$G_n = G_1 + G_2 + G_3 \tag{III.3}$$

La figure suivante exprime les différentes parties du noyau.

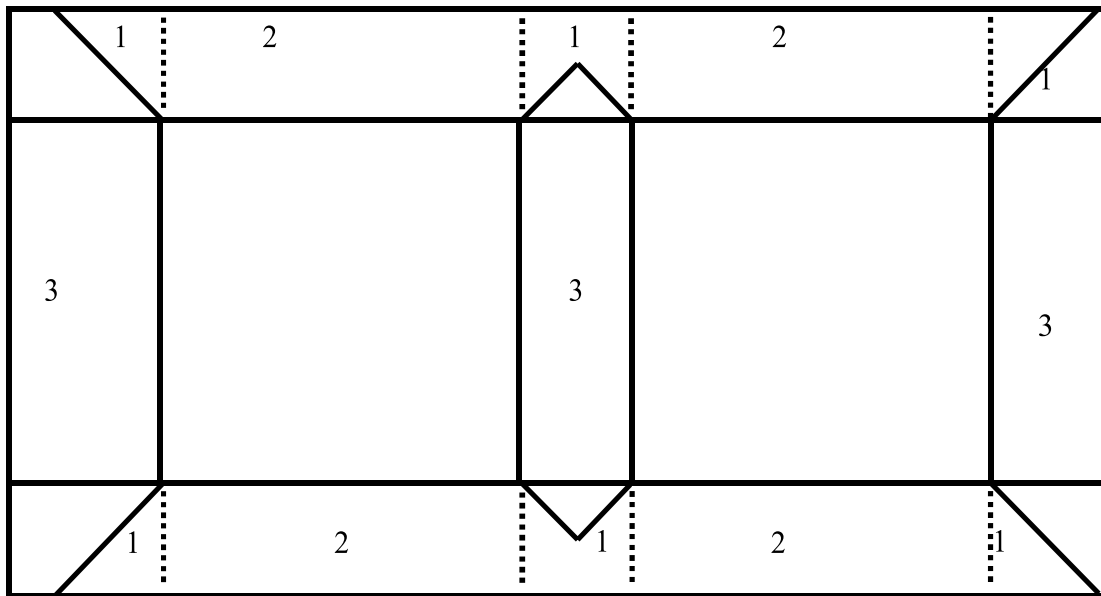


Figure III.1. Les éléments du noyau [4].

**1: Coins**

**2: Culasses**

**3: Colonnes**

Le poids total des coins  $G_1$  est :

$$G_1 = \delta_{fer} \cdot V_1 \tag{III.4}$$

La masse volumique de la tôle  $\delta_{fer}$  utilisée a P'ENEL est :

$$\delta_{fer} = 7,65 \text{ kg/dm}^3$$

Le volume total des coins  $V_1$  est exprimé comme suit :

$$V_1 = 6 \cdot (BS_1 \cdot S_{fer}) \tag{III.5}$$

Donc d'après (III.4), (III.5) et pour le diamètre de 194mm , on obtient :

$$G_1 = \delta_{fer} \cdot 6 \cdot BS_1 \cdot S_{fer}$$

$$G_1 = 7,65 \times 6 \times 180 \times 259,6 \times 10^{-4} = 214,4815 \text{ kg}$$

$$G_1 = 214,482 \text{ kg}$$

Le poids des culasses diminuées des coins  $G_2$  est :

$$G_2 = \delta_{fer} \cdot v_2 \tag{III.6}$$

Le volume total des culasses  $v_2$  est :

$$v_2 = 4 \cdot L_f \cdot S_{fer} \tag{III.7}$$

Alors d'après (III.6) et (III.7) :

$$G_2 = \delta_{\text{fer}} \cdot 4 \cdot L_f \cdot S_{\text{fer}}$$

$$G_2 = 7,65 \times 4 \times 153 \times 259,6 \times 10^{-4} = 121,54 \text{ kg}$$

$$G_2 = 121,54 \text{ kg}$$

Le poids total des colonnes  $G_3$  est :

$$G_3 = \delta_{\text{fer}} \cdot v_3 \quad (\text{III.8})$$

Volume des colonnes  $V_3$  est :

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

D'après (III.8) et (III.9) on a :

$$G_3 = \delta_{\text{fer}} \cdot 3 \cdot H_c \cdot S_{\text{fer}}$$

$$G_3 = 7,65 \times 3 \times 520 \times 259,6 \times 10^{-4} = 309,8066 \text{ kg}$$

$$G_3 = 309,807 \text{ kg}$$

Donc, d'après (III.3) et avec les valeurs de  $G_1$ ,  $G_2$  et  $G_3$  on aura :

$$G_n = 214,482 + 121,54 + 309,807 = 645,828 \text{ kg}$$

$$G_n = 645,828 \text{ kg}$$

Finalement, d'après (III.2) la valeur de  $p_0$  est :

$$P_0 = \delta_{1,5} \cdot K_{\text{BP}} \cdot G_n \quad (\text{III.10})$$

$$P_0 = 0,97 \times 1,602 \times 645,828 = 1004 \text{ W}$$

$$P_0 = 1,004 \times 10^3 \text{ W}$$

### III.1.2 Calcul des pertes supplémentaires dans les coins $Ps_1$

Elles sont dues à la non continuité du circuit magnétique qui provoque une distorsion des lignes du champ. Ces dernières sont déviées par rapport au sens de laminage. Elles sont estimées à 50% des pertes fer dans les coins.

Ces pertes sont données par la relation suivante pour les deux transformateurs :

$$Ps_1 = 0,5 \cdot \delta_{1,5} \cdot K_{\text{BP}} \cdot G_1 \quad (\text{III.11})$$

$$Ps_1 = 0,5 \times 0,97 \times 1,602 \times 214,482 = 166,646 \text{ W}$$

$$Ps_1 = 166,646 \text{ W}$$

### III.1.3 Calcul des pertes supplémentaire dans les colonnes et les culasses $P_{s2}$

Elles sont estimées à 15% des pertes dans le noyau sans les coins, elles sont dues à la variation de structure des tôles lors de leur usinage et aux accessoires de fixation du noyau.

Elles sont données par :

$$P_{s2} = 0,5 \cdot \delta_{1,5} \cdot K_{BP} (G_2 + G_3) \quad (\text{III.12})$$

$$P_{s2} = 0,5 \cdot 0,97 \cdot 1,602 (121,54 + 309,807) = 100,538 \text{ W}$$

$$P_{s2} = 100,538 \text{ W}$$

Finalemment et d'après (III.10), (III.11) et (III.12), Pour le transformateur bobinage en AL ces pertes fer égale à :

$$P_0 = P_0 + P_{s1} + P_{s2} \quad (\text{III.13})$$

$$P_0 = 1010,51 + 166,646 + 100,538 = 1,271 \times 10^3 \text{ W}$$

$$P_0 = 1,271 \times 10^3 \text{ W}$$

Les pertes fer de  $P_0$  sont inférieures à celle fixées par le cahier des charges, donc elles sont admissibles.

## III.2 Calcul des pertes joules $P_{cc}$

Ces pertes sont causées par les courants qui traversent les enroulements, elles sont données par l'essai en court-circuit.

### III.2.1 Calcul des pertes joules totales en charge $P_{cc2}$ pour l'enroulement BT

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{cc2} = P_{cc20} + P_{ex} + P_{in} + P_{2con} + P_{sup2} \quad (\text{III.14})$$

**Avec :**

**$P_{cc20}$**  : pertes joules au secondaire.

**$P_{ex}$**  : pertes externes.

**$P_{in}$**  : pertes interne.

**$P_{2con}$**  : pertes par connexion

**$P_{sup2}$**  : pertes par effet pelliculaire.

#### III.2.1.1 Calcul des pertes joules au secondaire

$$P_{cc20} = m \cdot k_t \cdot G_{c2} \cdot (J_{m2})^2 \quad (\text{III.15})$$

$m$  : nombre de phase,  $m = 3$

$K_T$  : facteur tenant compte de la conductivité des conducteurs à  $75^\circ\text{C}$ ,  $K_T = 12,65$

$G_{c_2}$  : poids de l'enroulement basse tension, il est égale à :

$$G_{c_2} = \gamma \cdot L_2 \cdot S_2 \quad (\text{III.16})$$

1)  $L_2$  : longueur totale de l'enroulement basse tension.

$$L_2 = W_2 \cdot L_{m_2} \quad (\text{III.17})$$

❖  $L_{m_2}$  : Longueur moyenne de la spire

$$L_{m_2} = \pi \cdot D_{m_2} \quad (\text{III.18})$$

$D_{m_2}$  : diamètre moyen de la spire.

$$D_{m_2} = D + 2 \cdot a_{20} + a_2 \quad (\text{III.19})$$

$$D_{m_2} = 194 + (2 \times 4) + 21$$

$$D_{m_2} = 223 \text{ mm}$$

Donc d'après (III.18) la valeur de  $L_{m_2}$  est égale à :

$$L_{m_2} = \pi \cdot D_{m_2}$$

$$L_{m_2} = \pi \cdot 223 = 700,575 \text{ mm}$$

Et d'après (III.17) :

$$L_2 = 23 \times 700,575 = 1,611 \times 10^4 \text{ mm}$$

$$L_2 = 1,611 \times 10^4 \text{ mm}$$

$\gamma$  : Densité volumique des conducteurs, elle est égale à :  $\gamma = 2,6 \text{ Kg /m}^3$

Finalement d'après (III.16) la valeur de  $G_{c_2}$  est la suivante :

$$G_{c_2} = 2,6 \times 1,611 \times 10^4 \times 263,3 \times 10^{-6} = 11,031 \text{ kg}$$

$$G_{c_2} = 11,031 \text{ kg}$$

D'après (III.15) les pertes joule au secondaire sont égale à :

$$P_{cc_{20}} = m \cdot K_t \cdot G_{c_2} \cdot J_{m_2}^2$$

$$P_{cc_{20}} = 3 \times 12,65 \times 11,031 \times 3,454^2 = 4994,26 \text{ W}$$

$$P_{cc_{20}} = 4994 \text{ W}$$

### III.2.1.2 Pertes externes $P_{ex}$

Ces pertes sont dues aux isolateurs, aux pièces de sortie et aux bornes de connexion.

$$P_{ex} = 20 \text{ W}$$

**III.2.1.3 Pertes internes Pin**

Elles sont données par l'expression suivante :

$$P_{in} = \frac{e \cdot K_T \cdot I_{m2}^2 \cdot G_{c2} \cdot F}{W_2} \tag{III.20}$$

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

**F** : facteur empirique en fonction du couplage de la basse tension.

Ces deux facteurs sont donnés par le tableau suivant :

Tab III.2 Les valeurs des facteurs "e" et "F" [4].

Intensité du courant-secondaire [A]	e	F	
		ΔY	Z
30-100	1.04	1.0	1.0
101-400	1.05		
401-700	1.07		2.0
701-1200	1.09		
1201-1500	1.12		
1501-1800	1.15		

Donc pour un courant secondaire égale à 909,3A, on a : e = 1,09 et F=1

D'après (III.20) :

$$P_{in} = \frac{1,09 \times 12,65 \times 3,454^2 \times 11,031 \times 1}{23} = 78,89 \text{ W}$$

**III.2.1.4 Pertes par connexion**

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

on a :

$$P_{2con} = R_{2con} \cdot I_{n2}^2 \tag{III.21}$$

a) **R<sub>2con</sub>** : résistance des fils de connexion, elle est donnée par la formule suivante :

$$R_{2con} = \rho_{75^\circ} \cdot \frac{L_{2con}}{S_2} \tag{III.22}$$

Pour les fils en AL :

$$\diamond L_{2con} = 3,15 + 2 \cdot E_c \tag{III.23}$$

$$L_{2\text{con}} = 3,15 + (2 \times 333) = 669,15 \text{ mm}$$

Donc d'après (III.22) :

$$R_{2\text{con}} = 0,033 \times \frac{669,15 \times 10^{-3}}{263,3} = 8,265 \times 10^{-5} \Omega$$

Finalement est d'après (III.21) la valeur de  $P_{2\text{con}}$  est la suivante :

$$P_{2\text{con}} = (8,265 \times 10^{-5}) \times 909,327^2 = 68,338 \text{ W}$$

$$P_{2\text{con}} = 68,338 \text{ W}$$

### III.2.1.5 Pertes par effet pelliculaire $P_{\text{sup}2}$

Elles sont dues à l'effet de peau électrique, déterminées par la relation suivante :

$$P_{\text{sup}2} = (K_{mr2} - 1) \cdot m_2 \cdot R_2 \cdot I_n^2 \quad (\text{III.24})$$

- a)  **$K_{mr2}$**  : Coefficient de majoration de la résistance en courant alternatif, pour un conducteur méplat, ce coefficient est déterminé par :

$$K_{mr2} = 1 + \left[ \frac{n_2^2 - 0,2}{9} \right] \cdot (\alpha \cdot a)^4 \quad (\text{III.25})$$

**a** : Epaisseur du conducteur en mm, **a** = 7mm

**n<sub>2</sub>** : nombre de couche basse Tension, **n<sub>2</sub>** = 2couches

❖ **Calcul du paramètre  $\alpha$  :**

$$\alpha = \sqrt{\frac{W_2 \cdot b \cdot \omega \cdot \mu_0}{h_{m,2} \cdot \rho_{75}}} \quad (\text{III.26})$$

$\omega$  : Pulsation du réseau,  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

$\mu_0$  : Perméabilité magnétique dans le vide :  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$

Donc d'après (III.26) :

$$\alpha = \sqrt{\frac{23 \times 39,5 \times 2\pi \times 50 \times 4\pi \times 10^{-7}}{454 \times 2 \times 0,033}} = 0,1095$$

$$\alpha = 0,11$$

Finalement et d'après (III.25) :

$$K_{mr2} = 1 + \left[ \frac{2^2 - 0,2}{9} \right] \times (0,11 \times 7)^4 = 1,15$$

$$K_{mr2} = 1,15$$

- b) **Calcul de la Résistance de l'enroulement  $R_2$**

$$R_2 = \rho_{75^\circ} \cdot \frac{L_2}{S_2} \quad (\text{III.27})$$



$$R_2 = 0.033 \cdot \frac{16110 \times 10^{-3}}{263,3} = 0,00202 \Omega$$

$$R_2 = 2 \times 10^{-3} \Omega$$

Finalement d'après (III.24) les pertes  $P_{sup_2}$  sont égales à :

$$P_{sup_2} = (1,15 - 1) \times 3 \times (2 \times 10^{-3}) \times 909,327^2 = 738,37 \text{ W}$$

$$P_{sup_2} = 738,37 \text{ W}$$

Après avoir calculée les pertes précédentes et d'après (III.14), on peut déterminer les pertes totales en charge qui sont égales à :

$$P_{cc_2} = P_{cc_{20}} + P_{ex} + P_{in} + P_{2con} + P_{sup_2}$$

$$P_{cc_2} = 4994 + 20 + 78,89 + 68,338 + 738,37 = 5,899 \times 10^3 \text{ W}$$

$$P_{cc_2} = 5,899 \times 10^3 \text{ W}$$

### III.2.2 Calcul des pertes joules totales en charge $P_{cc_1}$ pour l'enroulement HT

$$P_{cc_1} = P_{cc_{10}} + P_{1con} + P_{sup_1} \quad (III.28)$$

$P_{cc_{10}}$  : Pertes joules au primaire.

$P_{1con}$  : Pertes par connexion.

$P_{sup_1}$  : Pertes par effet pelliculaire

#### III.2.2.1 Calcul des pertes joules au primaire

$$P_{cc_{10}} = k_t \cdot m_2 \cdot Gc_1 \cdot J_1^2 \quad (III.29)$$

##### a) Calcul du poids de l'enroulement $Gc_1$

$$Gc_1 = \gamma \cdot L_1 \cdot S_1 \quad (III.30)$$

$L_1$  : Longueur totale de l'enroulement primaire

$$L_1 = W_1 \cdot Lm_1 \quad (III.31)$$

$Lm_1$  : longueur moyenne de la spire

$$Lm_1 = Dm_1 \cdot \pi \quad (III.32)$$

$Dm_1$  = diamètre moyen de la spire

$$Dm_1 = D + 2a_{20} + 2a_{12} + 2a_2 + a_1 \quad (III.33)$$

$$Dm_1 = 194 + (2 \times 4) + (2 \times 8) + (2 \times 21) + 57,5 = 317,5 \text{ mm}$$

Alors, d'après (III.32) :

$$Lm_1 = 317,5 \times \pi = 997,456 \text{ mm}$$

D'après (III.31) On déduit  $L_1$  :

$$L1 = 996 \times 997,456 = 9,935 \times 10^5 \text{ mm}$$

$$L1 = 9,935 \times 10^5 \text{ mm}$$

Donc, d'après (III.30)  $G_{c1}$  est égale à :

$$G_{c1} = 2,6 \times (9,935 \times 10^5) \times 7,793 \times 10^{-3} = 20130 \text{ g}$$

$$G_{c1} = 20,13 \text{ kg}$$

Finalement et d'après (III.29) :

$$P_{cc10} = 3 \times 12,65 \times 20,13 \times 2,695^2 = 5,547 \times 10^3 \text{ W}$$

$$P_{cc10} = 5,547 \times 10^3$$

### III.2.2.2 Calcul des pertes par connexion :

$$P_{1con} = R_{1con} \cdot I_{n1}^2 \quad (III.34)$$

#### a) Calcul de la résistance des fils de connexion

$$R_{1con} = \rho_{75} \cdot \frac{L_{1con}}{S_1} \quad (III.35)$$

$$L_{1con} = H_m \cdot 7,5 \quad (III.36)$$

$$L_{1con} = 446 \times 7,5 \times 10^{-3} = 3,345 \text{ m}$$

D'après (III.35) :

$$R_{1con} = 0,033 \times \frac{3,345}{7,793} = 0,01417 \Omega$$

$$R_{1con} = 0,014 \Omega$$

Donc, d'après (III.34) :

$$P_{1con} = 0,014 \times 36,373^2 = 18,467 \text{ W}$$

$$P_{1con} = 18,467 \text{ W}$$

### III.2.2.3 Pertes par effet pelliculaire $P_{sup1}$

$$P_{sup1} = (K_{mr1} - 1) \cdot m_2 \cdot R_1 \cdot I_{n1}^2 \quad (III.37)$$

a)  $K_{mr1}$  : Coefficient de majoration de la résistance en courant alternatif, il est calculé comme suit :

$$K_{mr1} = 1 + \frac{Nc^2 - 0,2}{9} \cdot (\alpha_1 \cdot d_1)^4 \quad (III.38)$$

❖ Calcul de  $\alpha_1$ 

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{d_1 \cdot N_{2d} \cdot \omega \cdot \mu_0}{2 \cdot H_m \cdot \rho_{75^\circ}}} \quad (\text{III.39})$$

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{3,15 \times 136,017 \times 2 \times \pi \times 50 \times 4 \times \pi \times 10^{-7}}{2 \times 446 \times 0,033}} = 0,0758$$

$$\alpha_1 = 0,076$$

Donc d'après (III.38) :

$$K_{mr1} = 1 + \frac{8^2 - 0,2}{9} \times (0,076 \times 3,15)^4 = 1,024$$

b) Calcul de la résistance de l'enroulement  $R_1$ 

$$R_1 = \rho_{75^\circ} \cdot \frac{L_1}{S_1} \quad (\text{III.40})$$

$$R_1 = 0,033 \times \frac{9,935 \times 10^5 \times 10^{-3}}{7,793} = 4,146 \Omega$$

$$R_1 = 4,146 \Omega$$

Donc, d'après (III.37) Les pertes par effet pelliculaire sont égales a :

$$P_{\text{sup1}} = (1,024 - 1) \times 3 \times 4,146 \times 36,373^2 = 390,473 \text{ W}$$

$$P_{\text{sup1}} = 390,473 \text{ W}$$

Finalement et d'après (III.28) les pertes totales en charge  $P_{cc1}$  sont égales a :

$$P_{cc1} = (P_{cc10} + P_{1\text{con}} + P_{\text{sup1}}) \times 10^{-1} \quad (\text{III.41})$$

$$P_{cc1} = ((5,547 \times 10^3) + 18,467 + 390,473) \times 10^{-1} = 595,604 \text{ W}$$

$$P_{cc1} = 595,604 \text{ W}$$

III.2.3 Calcul des pertes joules  $P_{cc}$  :

$$P_{cc} = P_{cc1} + P_{cc2} \quad (\text{III.42})$$

$$P_{cc} = (595,604) + (5,899 \times 10^3) = 6,494 \times 10^3 \text{ W}$$

$$P_{cc} = 6,494 \text{ kW}$$

L'erreur sur les pertes joules  $P_{cc}$  est inférieure à **15%** donc cette valeur est admissible, selon la norme **CEI 60 076**

## ❖ Calcul du poids des conducteurs :

Dans un transformateur le poids des conducteurs est donné par l'expression suivante :

$$G_c = m (G_{c_2} + G_{c_1}) \quad (\text{III.43})$$

$$G_c = 3 (11,031 + 20,13) = 93,483 \text{ Kg}$$

$$G_c = 93,5 \text{ kg}$$

**III.3 Calcul définitif de la tension des courts circuits Ucc%**

Puisque on a la valeur finale des pertes joules Pcc, on peut déterminer la valeur finale de la composante active Ucca% de la tension de court-circuit, et avec la valeur de la composante réactive Uccr% de cette tension, on déduit la valeur définitive de la tension de cour circuit.

$$U_{cc_a}\% = \frac{P_{cc}}{S_n} \cdot 100 \quad (\text{III.44})$$

$$U_{cc_a}\% = \frac{6,494}{630} \cdot 100 = 1,03\%$$

$$U_{cc_a}\% = 1,03\%$$

La valeur de la composante réactive étant donnée Ucc<sub>r</sub> est calculée au chapitre précédent.

$$U_{cc_r} = 5,95\%$$

Alors

$$U_{cc} = \sqrt{U_{cc_a}^2 + U_{cc_r}^2} \quad (\text{III.45})$$

$$U_{cc} = \sqrt{1,03^2 + 5,95^2}$$

$$U_{cc} \% = 6,04 \text{ V}$$

L'erreur sur la tension de court-circuit inférieur à 10%, donc la valeur est acceptable.

# **Chapitre 4**

## **Applications et résultats**

## IV. Introduction

Dans ce chapitre nous rapportons tous les résultats de simulation par la méthode des éléments finis d'un transformateur triphasé à noyau.

La simulation est réalisée par le logiciel Ansys-Maxwell et cela pour différents paramètres géométriques et électromagnétiques du transformateur.

### IV.1 Ansys-Maxwell

Ansys-Maxwell est un logiciel de simulation du champ électromagnétique, utilisé dans le domaine de la conception et l'analyse des dispositifs électromagnétiques : (Moteurs électrique, capteur, transformateurs...Etc.).

Basé sur la méthode des éléments finis, Ansys-Maxwell permet de définir avec précision le mouvement mécanique et les grandeurs dérivées du calcul de champ électromagnétique.

Ansys-Maxwell facilite l'appréciation des performances des systèmes électromagnétiques bien avant de passer à la fabrication de prototypes. Ce laboratoire virtuel nous donne un avantage concurrentiel important : Amélioration des performances des systèmes, réduction des coûts de fabrication, gain du temps...etc. La figure (IV.1) représente l'interface de l'Ansys-Maxwell :

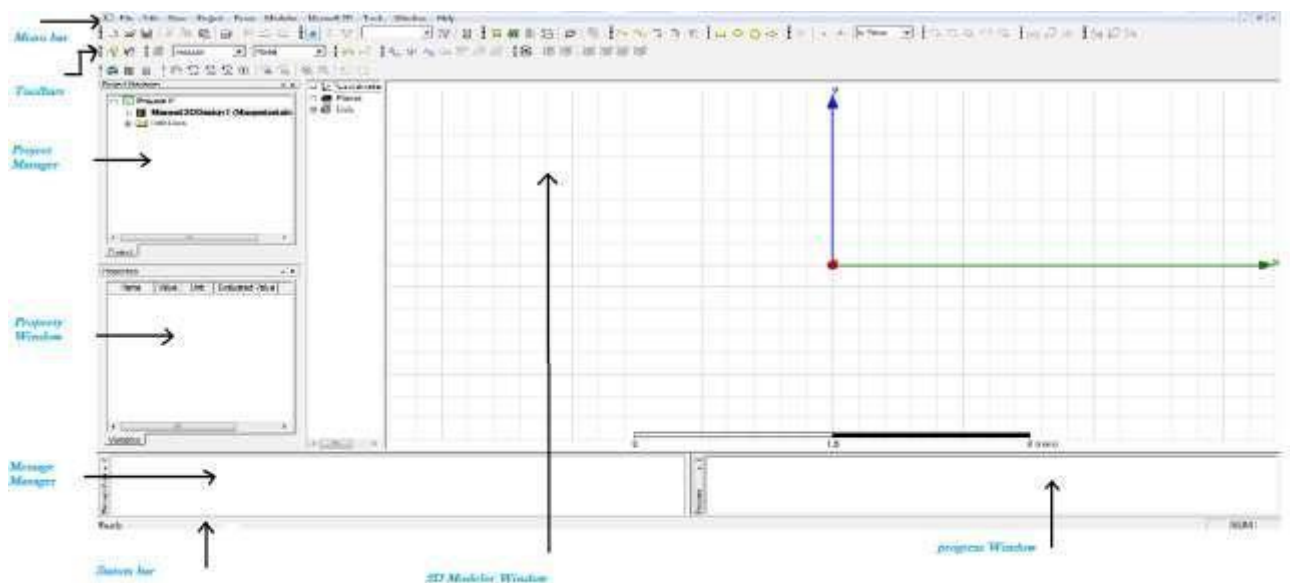


Fig. IV.1 Interface de Maxwell 2D

## IV.2 Equations de Maxwell [7]

Maxwell est arrivé à mettre en place quatre équations à partir des relations fondamentales de l'électricité et du magnétisme. Ces équations décrivent à elles seules tous les phénomènes physiques d'origines électromagnétiques. Elles sont aussi appelées « Equations générales d'électromagnétisme », qui sous leurs formes la plus générale s'écrit :

$$\text{Maxwell-Gauss:} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{IV.1})$$

$$\text{Maxwell-Faraday:} \quad \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{IV.2})$$

$$\text{Conservation du flux :} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{IV.3})$$

$$\text{Maxwell-Ampère:} \quad \vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{IV.4})$$

$\vec{E}$  [V/m] et  $\vec{H}$  [A/m] : Champ électrique et magnétique.

$\vec{D}$  [C/m<sup>2</sup>] et  $\vec{B}$  [T] : Induction électrique et magnétique.

$\vec{J}_c$  [A/m<sup>2</sup>] et  $\rho$  [C/m<sup>3</sup>] : Densité de courants de conduction et de charge électrique.

L'équation (IV.4) est une généralisation du théorème d'Ampère. Elle permet d'établir la relation entre le champ électromagnétique et les courants électriques. Elle traduit la création d'un champ magnétique par les courants électriques de conduction et de déplacement.

L'équation (IV.2) correspond à la loi d'induction de Faraday, qui établit le lien entre un champ électrique et un flux magnétique. Cette loi traduit le phénomène inductif qui se produit dans un conducteur soumis à un champ magnétique variable ou dans un conducteur en mouvement soumis à un champ magnétique constant.

Les équations (IV.4) et (IV.2) définissent la relation entre les champs et leurs sources.

Les équations (IV.1) et (IV.3) traduisent respectivement la conservation de la charge électrique et du champ magnétique.

### IV.2.1 Lois de comportement des milieux

Les grandeurs et les liaisons des cinq champs vectoriels précédents dépendent des caractéristiques électromagnétiques du milieu où ils règnent. Ainsi, pour définir complètement le phénomène électromagnétique à l'intérieur d'un milieu isotrope et homogène, on rajoute aux équations précédentes les lois de comportement de ce milieu :

- **Relations du milieu**

$$\vec{B} = \mu(\vec{H}) \cdot \vec{H} \quad (\text{IV.5})$$

$$\vec{D} = \varepsilon(\vec{E}) \cdot \vec{E} \quad (\text{IV.6})$$

Dans le cas linéaire nous avons :

$$\mu = \mu_0 \mu_r = C^{\text{te}} \quad (\text{IV.7})$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r = C^{\text{te}} \quad (\text{IV.8})$$

$\mu$ : Perméabilité magnétique [H/m].

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ : Perméabilité magnétique du vide [H/m].

$\mu_r$ : Perméabilité magnétique relative du milieu considéré.

$\varepsilon$ : Permittivité électrique [F/m].

$\varepsilon_0$ : Permittivité électrique du vide  $\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9}$  [F/m].

$\varepsilon_r$ : Permittivité relative du milieu considéré.

- **Loi d'Ohm**

Elle exprime la relation liant la densité du courant  $\vec{J}$  au champ électrique  $\vec{E}$  à travers la conductivité  $\sigma$ , elle est donnée par :

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{IV.9})$$

$\sigma$  : Conductivité électrique [ $(\Omega \cdot m)^{-1}$ ].

### IV.3 Applications

Pour cette étude l'Ansys-maxwell est utilisé pour modéliser un transformateur triphasé à noyau. Pour ce faire nous devons respecter les étapes suivantes :

1. Introduire la géométrie du transformateur.
2. Configurer les matériaux utilisés.
3. Choisir le type de la solution.
4. Injecter les conditions aux limites et l'excitation.
5. Configurer la solution après l'analyse.



## IV.3.1 Géométrie du problème

La géométrie étudiée dans notre travail est un transformateur triphasé à noyau (Fig. IV.2), il possède les dimensions mentionnées dans le tableau (IV.1) :

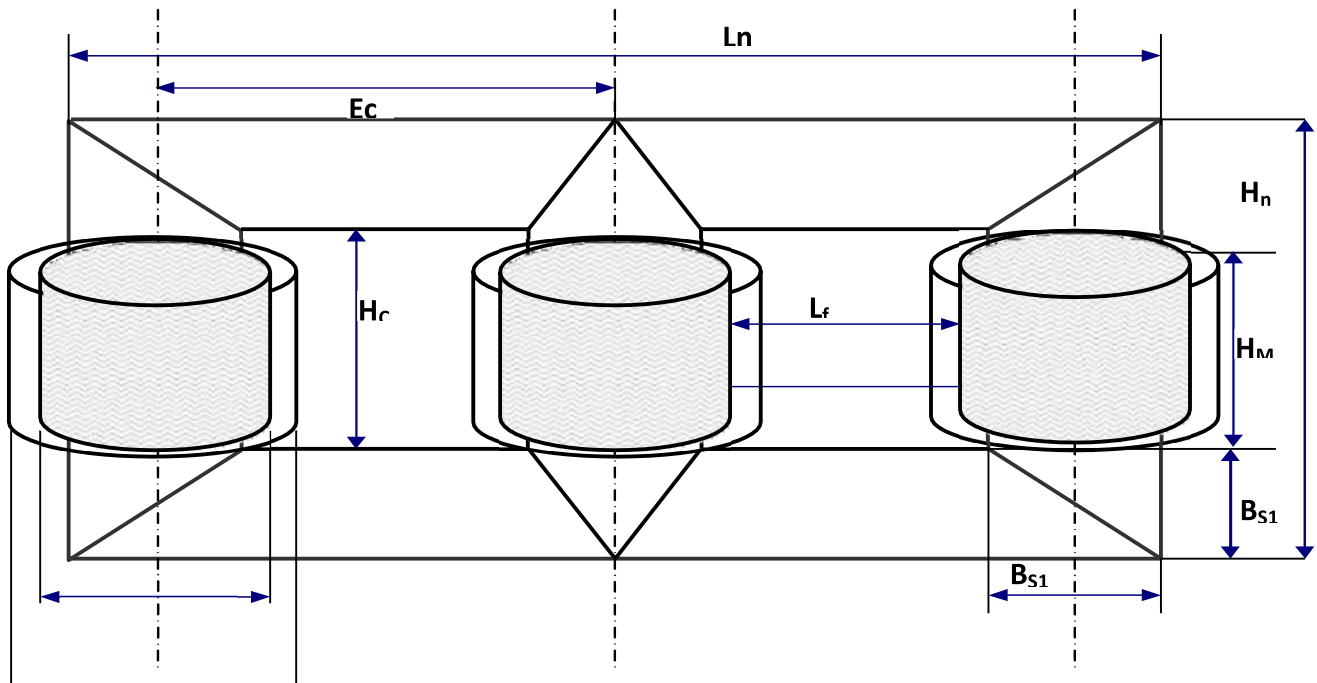


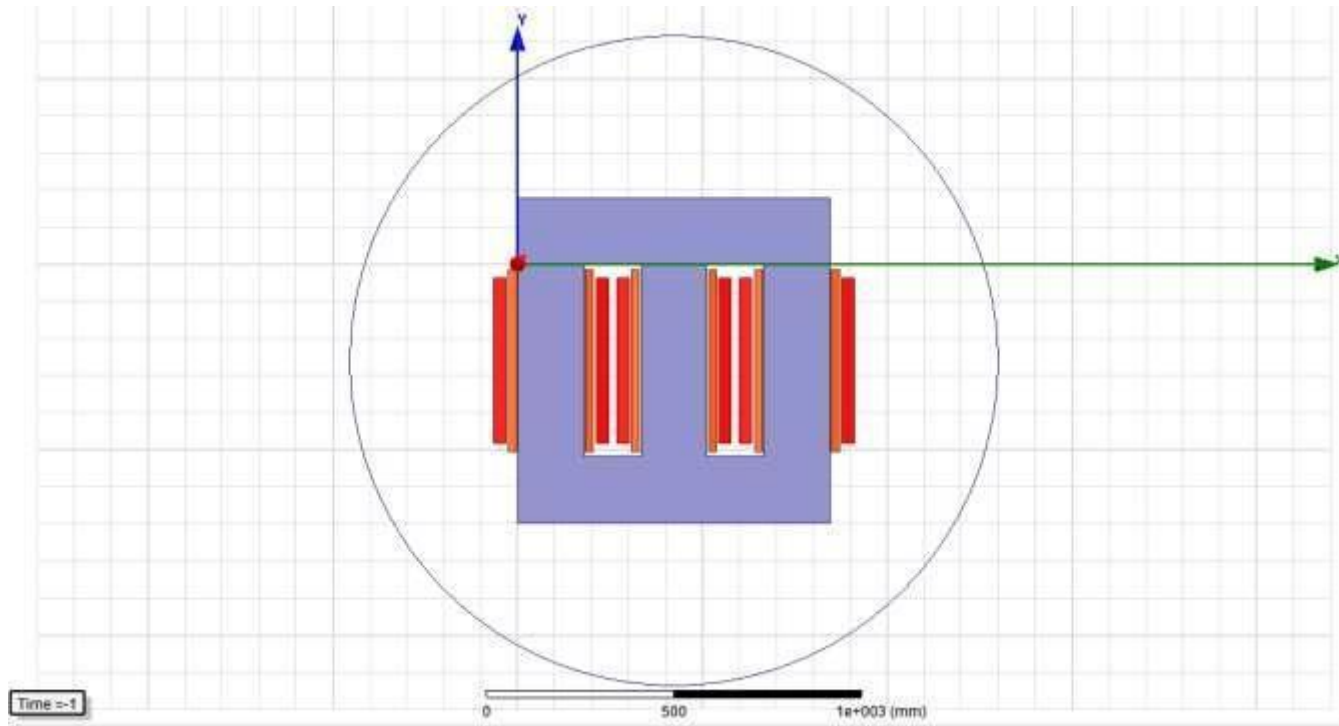
Fig. IV.2 Schéma du transformateur triphasé à noyau, [7].

Tab IV.1 Dimensions du transformateur triphasé à noyau

<b>Longueur du noyau</b>	$L_n = 846 \text{ mm}$
<b>Longueur de la fenêtre</b>	$L_f = 153 \text{ mm}$
<b>Hauteur du noyau</b>	$H_n = 880 \text{ mm}$
<b>Hauteur de montage des bobines</b>	$H_M = 506 \text{ mm}$
<b>Hauteur de la colonne</b>	$H_c = 520 \text{ mm}$
<b>Entre axe colonne</b>	$E_c = 333 \text{ mm}$
<b>Largeur du premier gradin</b>	$B_{S1} = 180 \text{ mm}$

**Remarque :** Ces dimensions sont obtenues par nos calculs (voir chapitre 2).

La figure IV.3 représente la géométrie du transformateur sous l'environnement Ansys-maxwell :

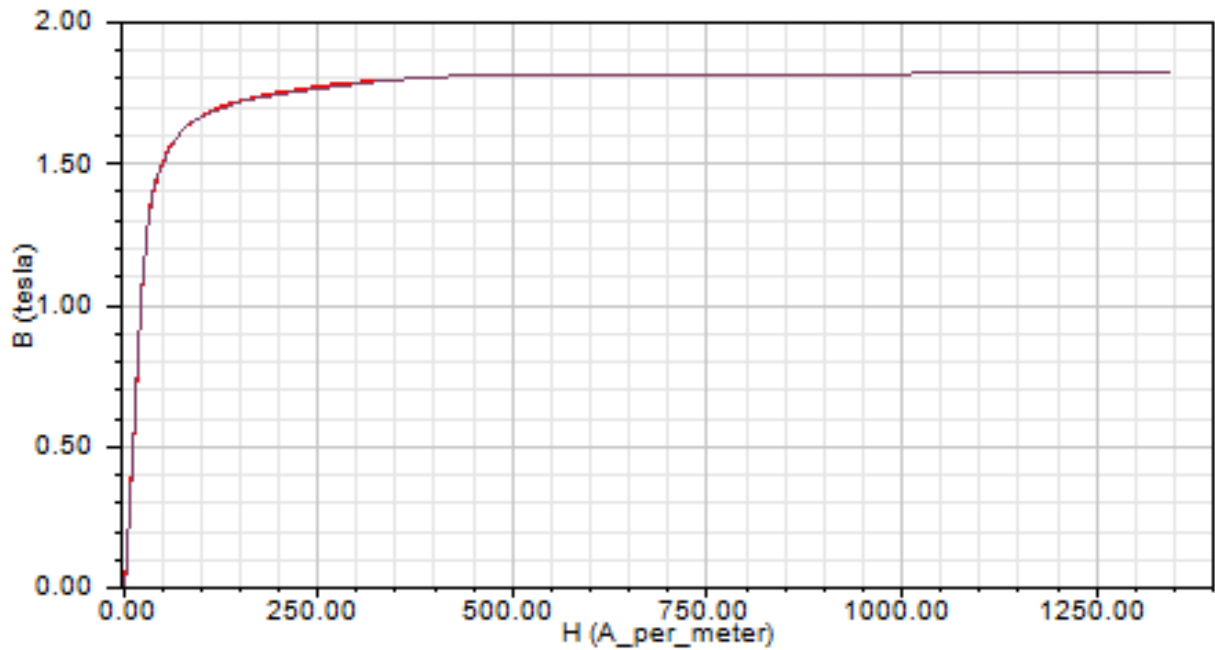


**Fig. IV.3** géométrie du transformateur sous l'environnement Ansys-Maxwell 2D.

### IV.3.2 Les matériaux utilisés

#### IV.3.2.1 Circuit magnétique [8]

La courbe B-H est la courbe caractéristique des propriétés magnétiques d'un matériau, elle indique comment le matériau réagit à un champ magnétique externe et constitue une information essentielle lors de la conception du circuit magnétique des machines électriques. La tôle utilisée pour la fabrication du circuit magnétique du notre transformateur est de type Fer-Si, sa courbe de première aimantation est donnée par la figure ci-dessous :



**Fig. IV. 4 :** Courbe de la première aimantation de la tôle magnétique utilisée à Electro-Industries pour la réalisation du transformateur triphasé à noyau.

#### IV.3.2.2 Enroulements

L'entreprise Electro-Industries a l'habitude de fabriquer les transformateurs de puissance ayant le bobinage des enroulements primaire et secondaire en cuivre. Cette étude proposée est pour la première fois où ils ont décidé d'utiliser le bobinage en aluminium. Ce type de transformateur est encore dans la phase d'étude.

#### IV.3.3 Type de solution

Pour ce problème on opte la solution transitoire.

#### IV.4 Application 01 : Essai à vide du transformateur

Dans cette application le primaire du transformateur est alimenté sous sa tension nominale, le secondaire n'est pas alimenté. Pour cela on a opté les paramètres suivants :

- Nombre de spire primaire  $N_1$  : 996 spires
- Nombre de spire secondaire  $N_2$  : 23 spires
- Tension d'alimentation : 10000 Volts

Les résultats de la simulation sont représentés dans les figures ci-après :

La figure IV.5 représente le maillage du champ électrique :

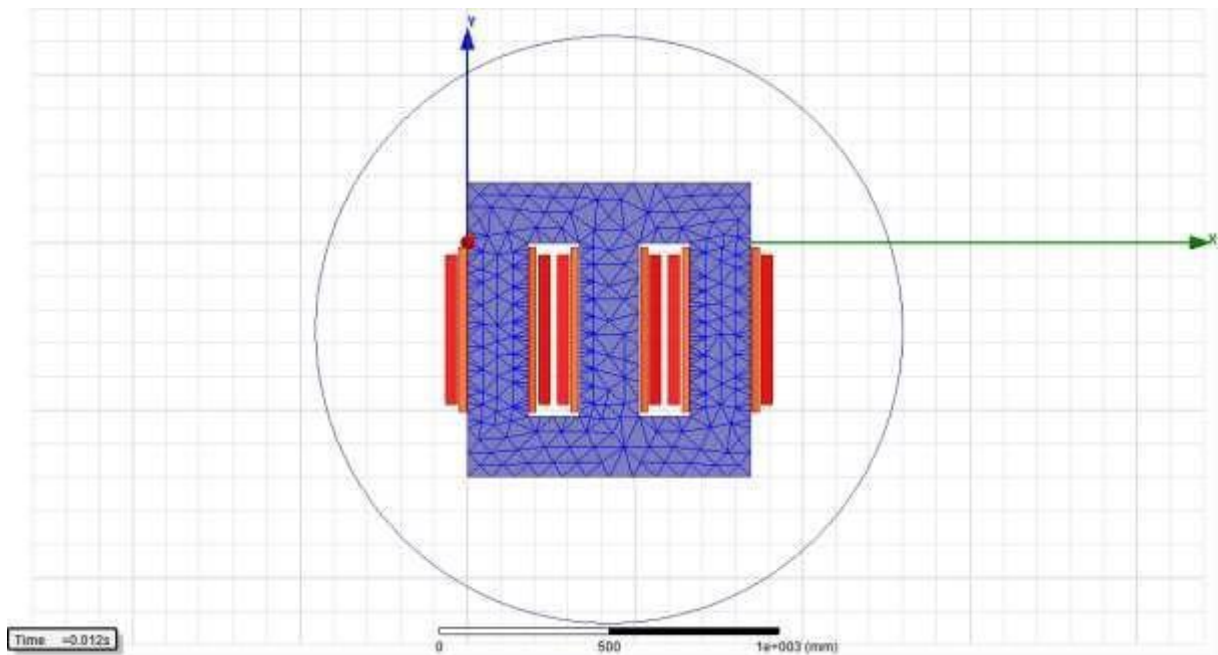


Fig. IV.5 Maillage du champ électrique

La figure IV.6 représente les lignes du flux :

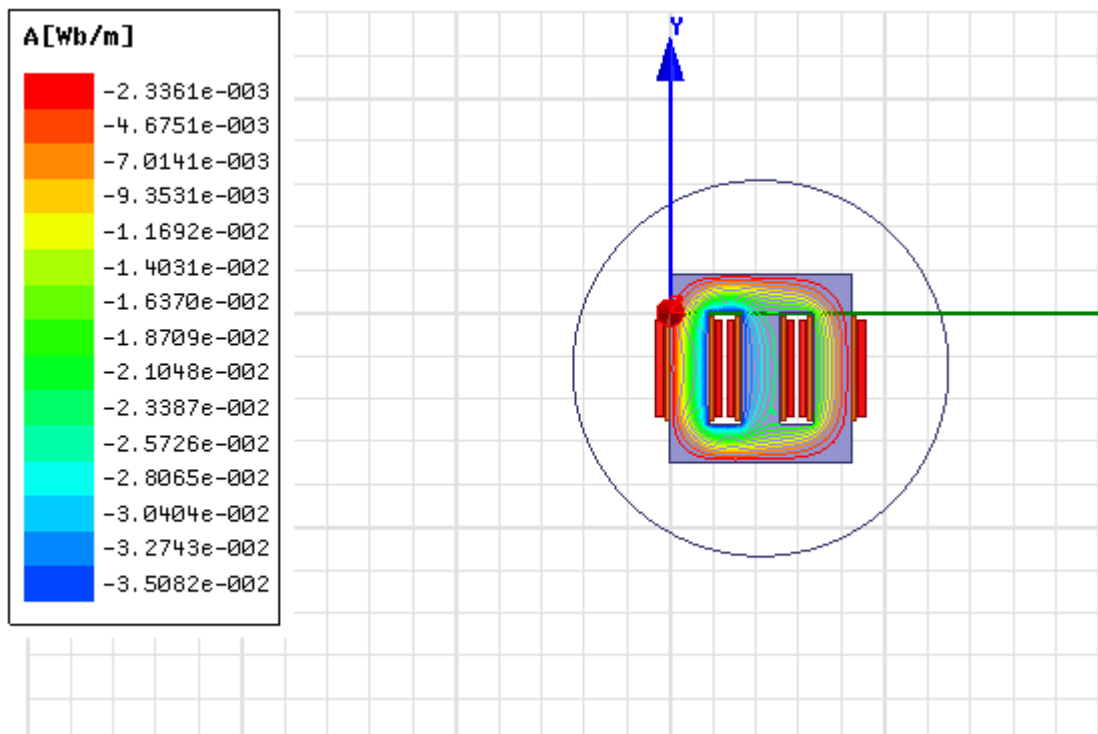


Fig. IV.6 Lignes du flux

La figure IV.7 représente la répartition de l'induction magnétique :

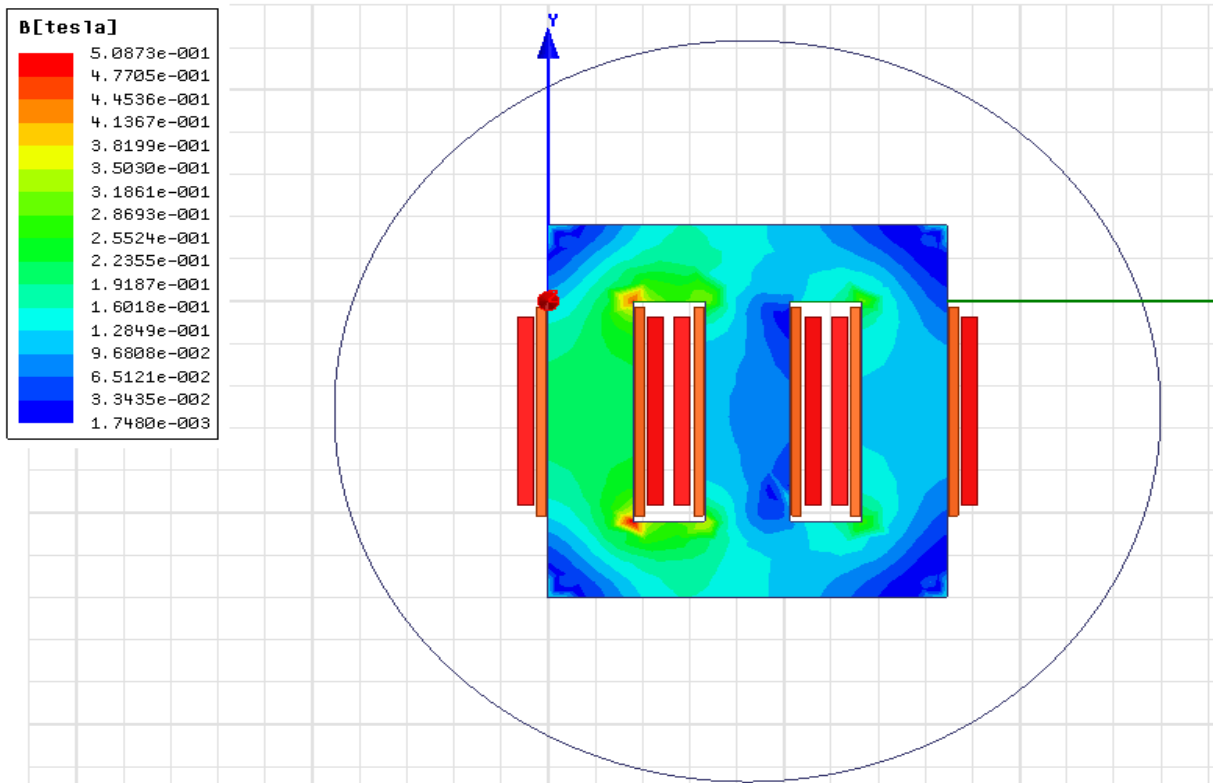


Fig. IV.7 Répartition d'induction magnétique

La figure IV.8 représente la répartition du champ magnétique :

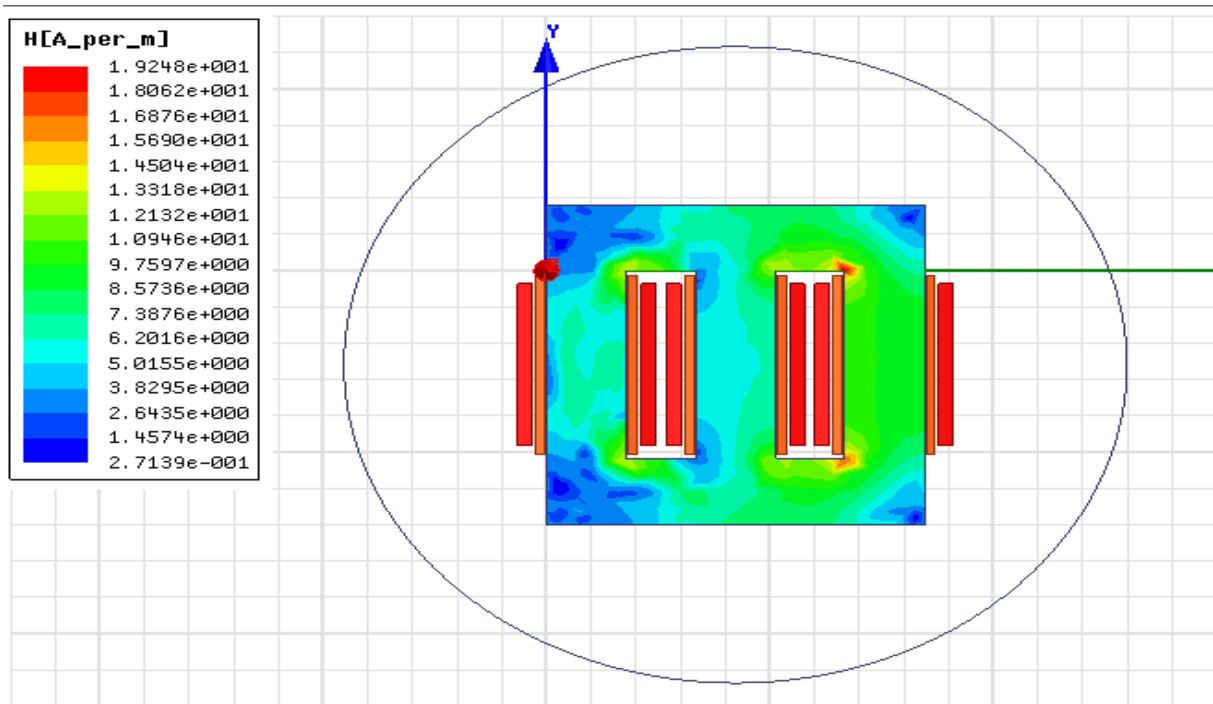


Fig. IV.8 Répartition du champ magnétique

Les figures IV.9 et IV.10 représentent la variation temporelle des tensions (primaire et secondaire) :

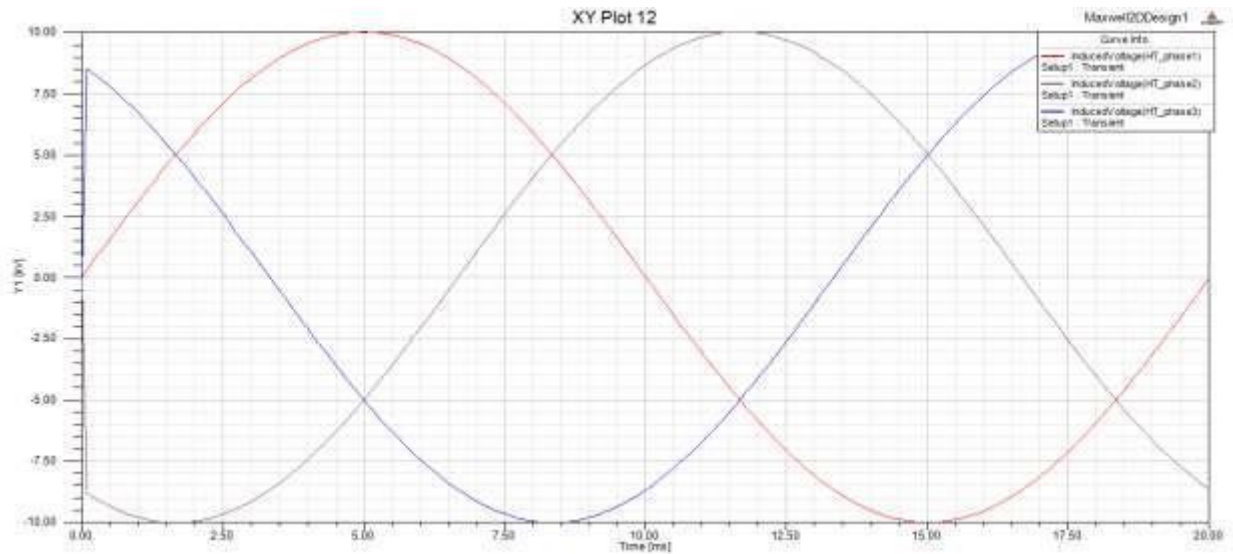


Fig. IV.9 Tension primaire pour les trois phases

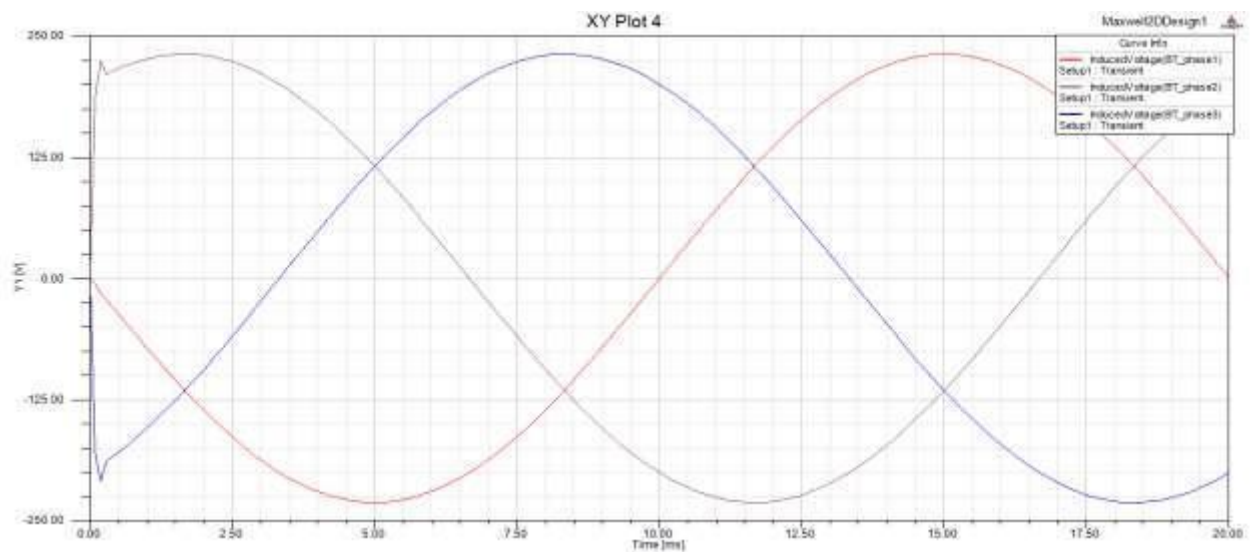


Fig. IV.10 Tension secondaire pour les trois phases

D’après les résultats de la simulation on a trouvé le rapport de transformation ( $m=0.023$ ). Il est confirmé avec celle obtenu par calcul. Donc le rapport de transformation est vérifié.

#### IV.5 Application 02 : Essai en court-circuit

Dans cette application le primaire du transformateur est alimenté sous une tension réduite. Le secondaire est en court-circuit et le courant de court-circuit au secondaire est à la valeur nominale. Pour réaliser cette application on a opté les paramètres suivants :

- Nombre de spire primaire  $N_1$  : 996 spires
- Nombre de spire secondaire  $N_2$  : 23 spires
- Résistance primaire :  $R_1 = 4.146 \text{ Ohm}$
- Résistance secondaire :  $R_2 = 2 \times 10^{-3} \text{ Ohm}$
- Inductance primaire :  $L_1 = 0.0303 \text{ Henry}$
- Inductance secondaire :  $L_2 = 4.85e \times 10^{-5} \text{ Henry}$
- Tension réduite :  $V = 424.26 \text{ Volts}$

Le schéma du transformateur en court-circuit par phase est donné par la figure dessous :

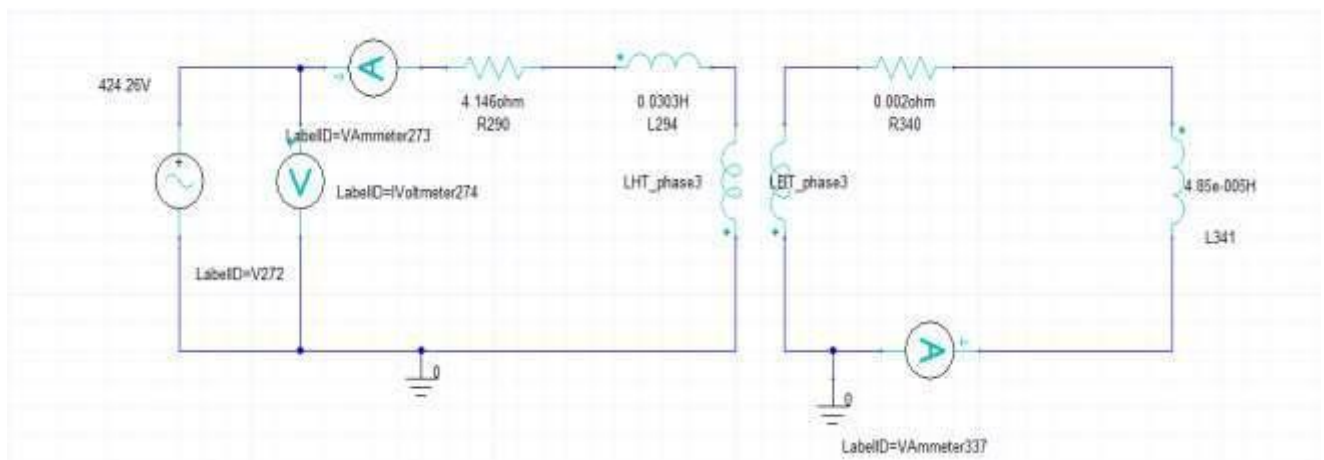


Fig. IV.11 Schéma du transformateur en court-circuit par phase

Les figures IV.12 et IV.13 représentent la variation temporelle des tensions (primaire et secondaire) :

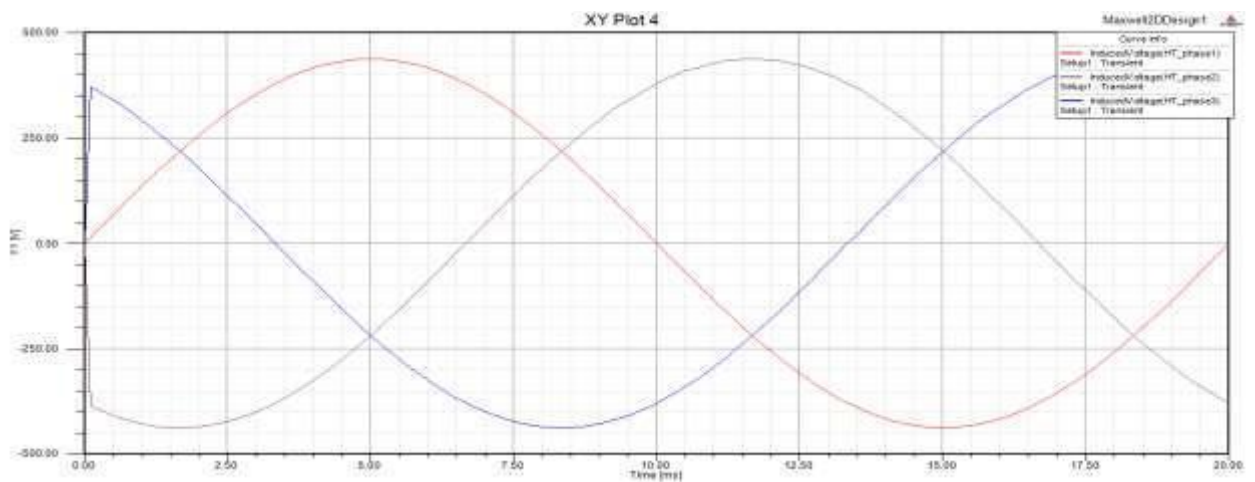


Fig. IV.12 Tension primaire pour les trois phases

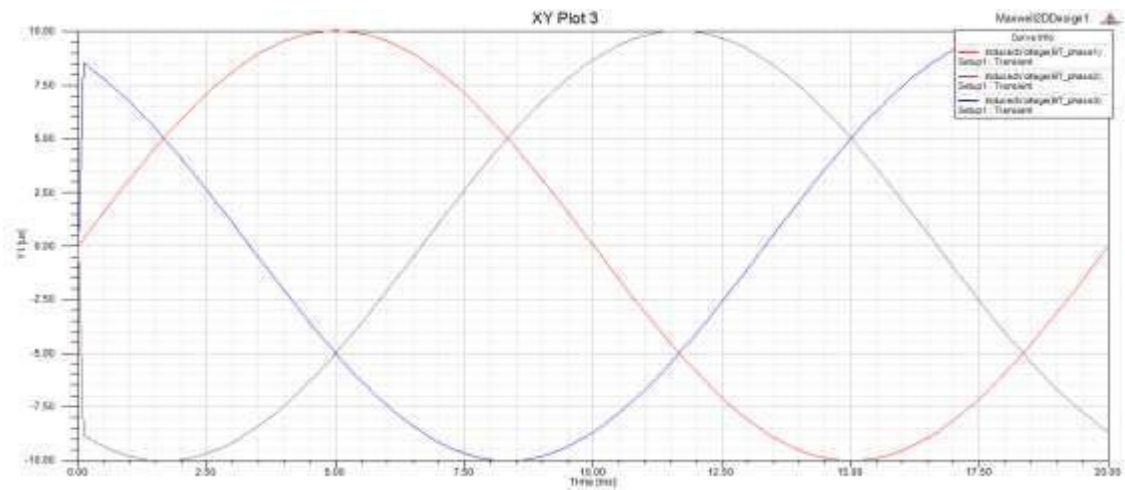


Fig. IV.13 Tension secondaire pour les trois phases

Les figures IV.14 et IV.15 représentent la variation temporelle des courants (primaire et secondaire) :

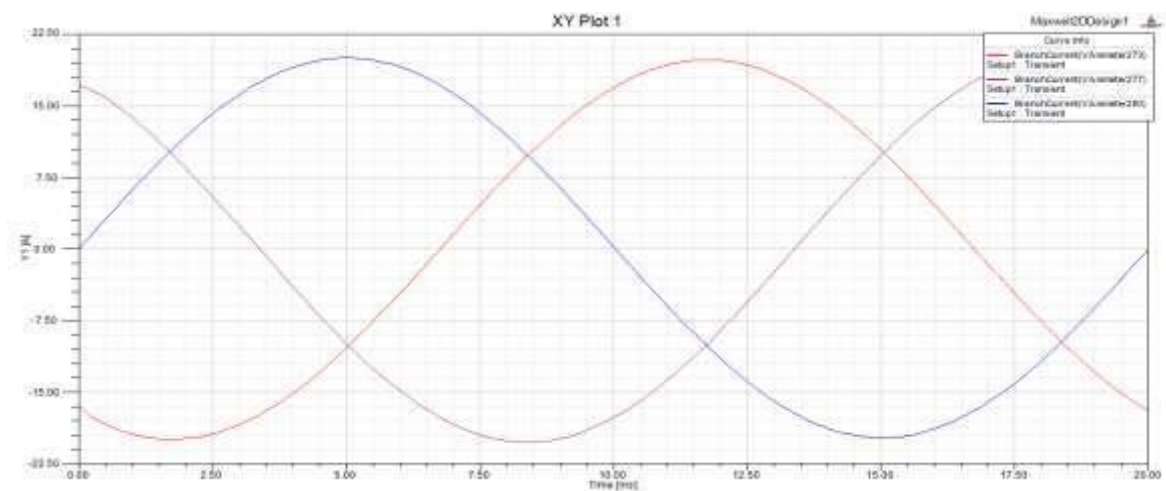


Fig. IV.14 Courant primaire pour les trois phases

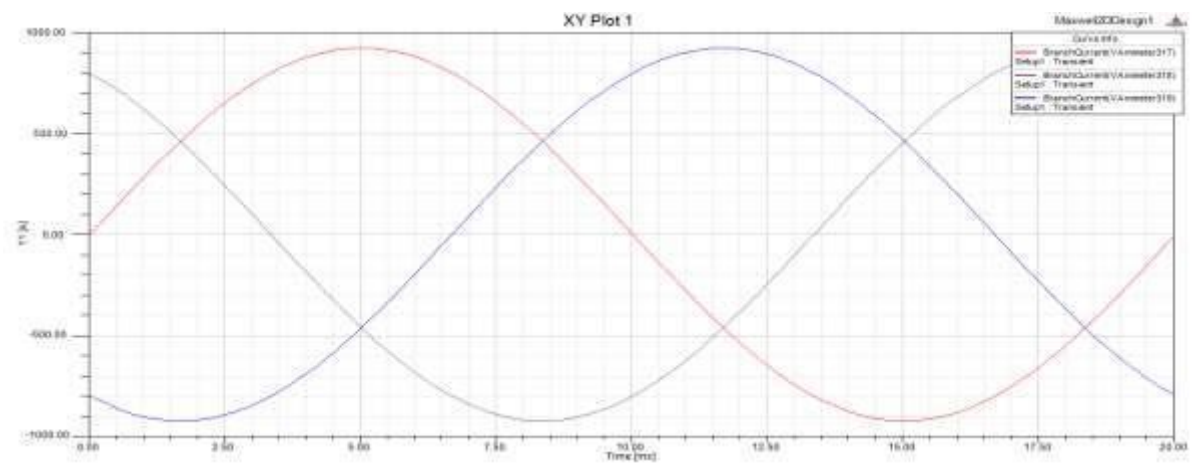


Fig. IV.15 Courant secondaire pour les trois phases



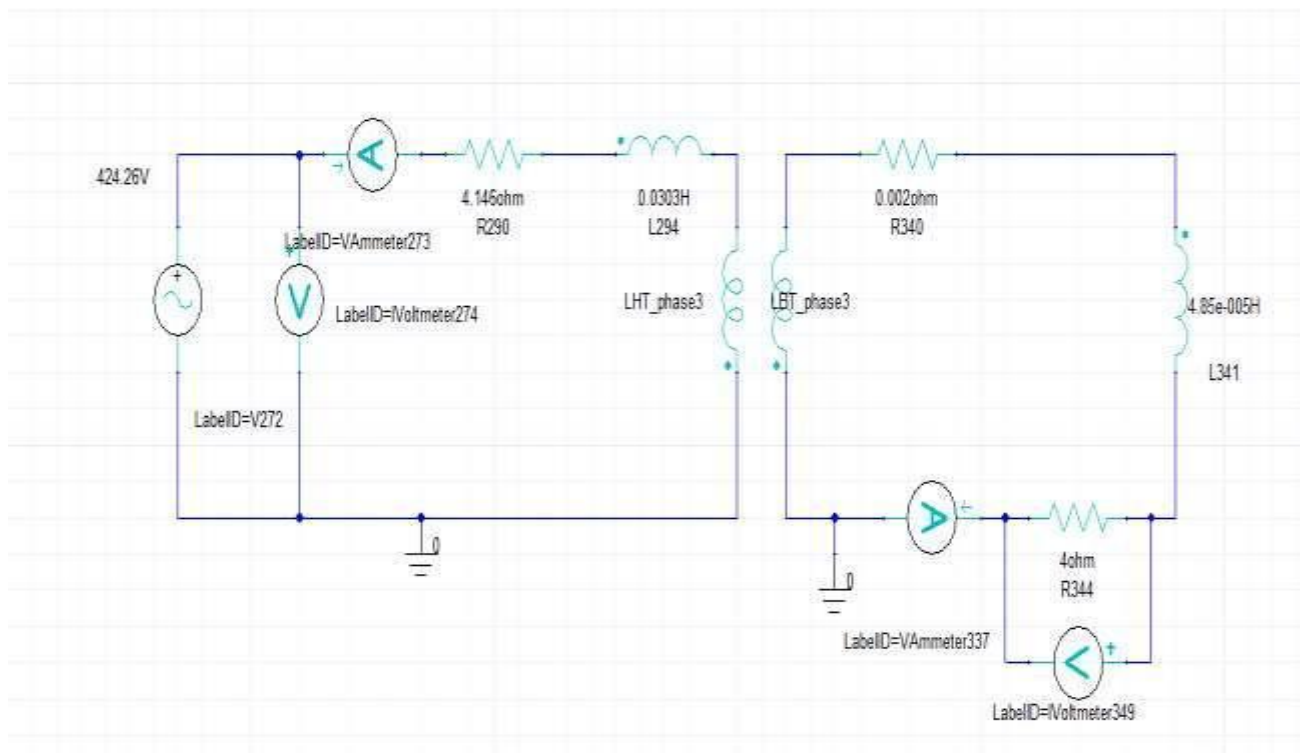
D'après les résultats de la simulation on a trouvé la tension du court-circuit ( $U_{cc\%} = 6$ ). Elle est confirmée avec celle obtenu par calcul. Donc la tension du court-circuit est vérifiée.

**IV.5 Application 03 : Transformateur en charge**

Dans cette application, nous avons chargé le transformateur avec une charge résistive Pour réaliser cette application on a opté les paramètres suivants :

- Nombre de spire primaire N1 : 996 spires
- Nombre de spire secondaire N2 : 23 spires
- Résistance primaire :  $R_1 = 4.146 \text{ Ohm}$
- Résistance secondaire :  $R_2 = 2 \times 10^{-3} \text{ Ohm}$
- Inductance primaire :  $L_1 = 0.0303 \text{ Henry}$
- Inductance secondaire :  $L_2 = 4.85e \times 10^{-5} \text{ Henry}$
- Tension réduite :  $V = 10000 \text{ Volts}$

Le schéma du transformateur en charge par phase est donné par la figure dessous :



**Fig. IV.16** schéma du transformateur en charge par phase

Les figures IV.17 et IV.18 représentent la variation temporelle des tensions (primaire et secondaire) :

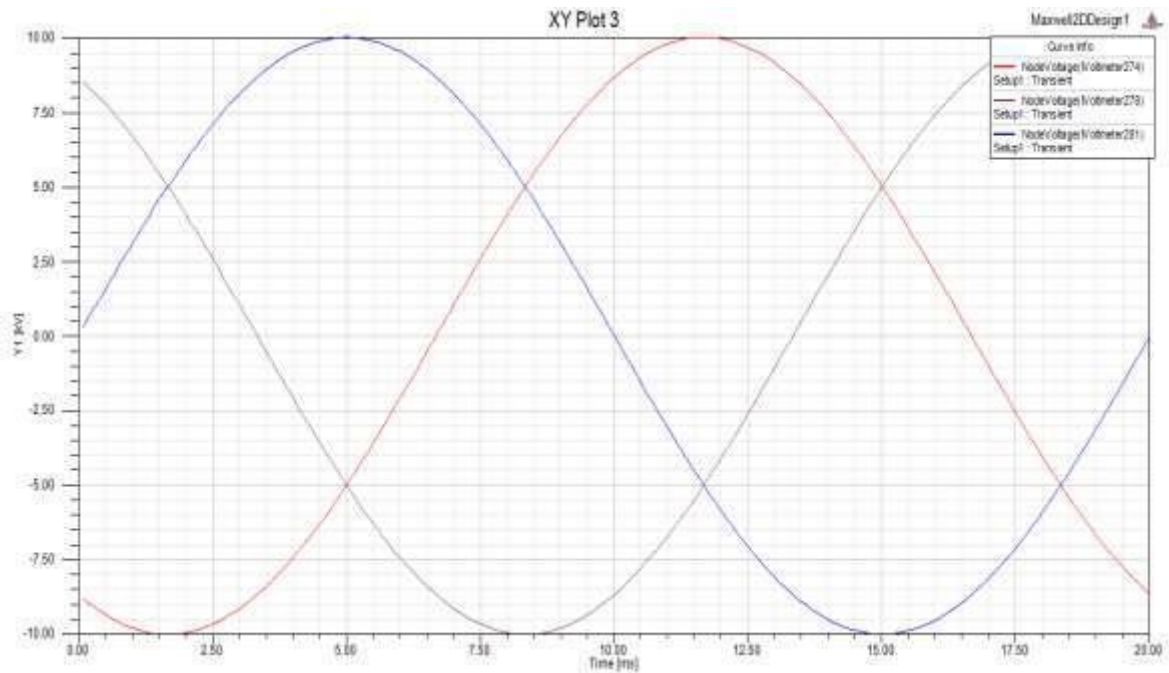


Fig. IV.17 Tension primaire pour les trois phases

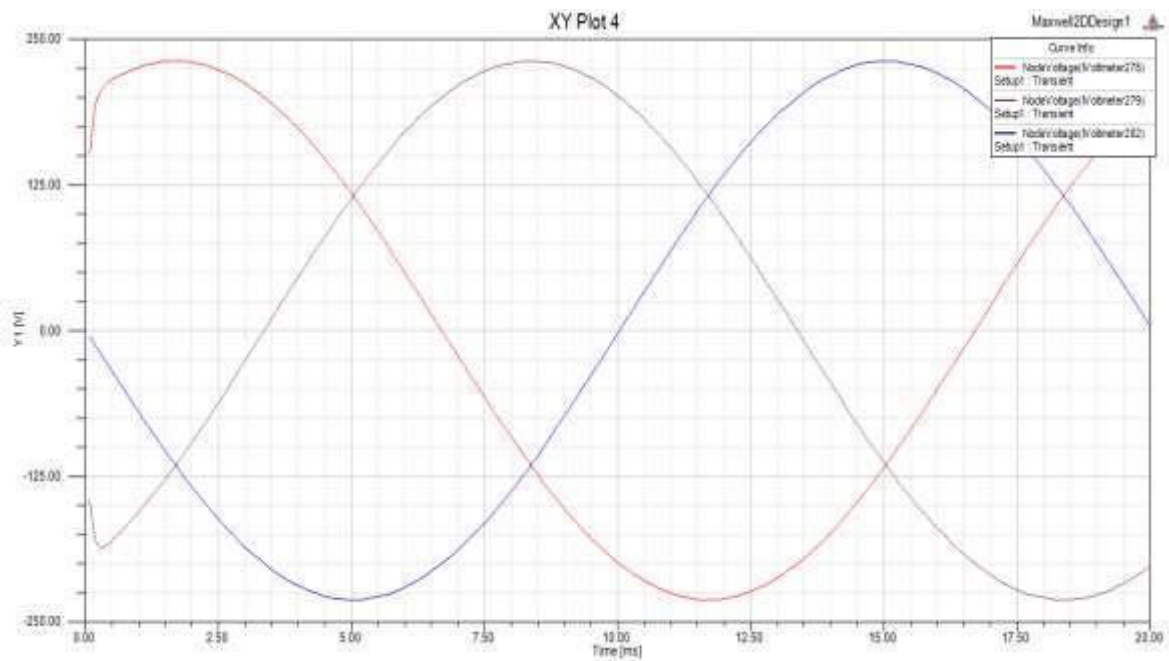


Fig. IV.18 Tension secondaire pour les trois phases

Les figures IV.19 et IV.20 représentent la variation temporelle des courants (primaire et secondaire) :

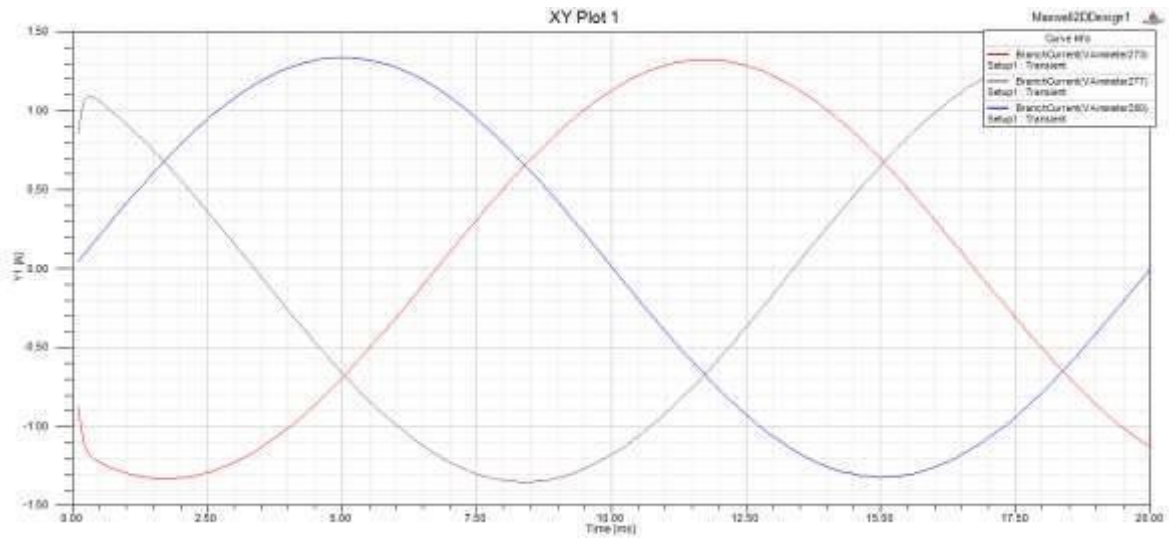


Fig. IV.19 Courant primaire pour les trois phases



Fig. IV.20 Courant secondaire pour les trois phases

D’après les résultats obtenus on confirme que la tension est la même dans les 3 phases d’où le bon fonctionnement de notre transformateur.

#### IV. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons procédé à la simulation d’un transformateur triphasé à noyau par la méthode des éléments finis. Cette étude nous a permis de vérifier les résultats théoriques et ceux obtenus par calculs.

# **Chapitre 5**

## **Construction d'un transformateur de puissance**

## V.1 Introduction

L'intérêt de ce chapitre est de décrire les différentes étapes suivies par la construction du transformateur.

## V.2 Partie active

### V.2.1 Noyau (le circuit magnétique) [8]

Le circuit magnétique est en tôles d'acier spécial dit acier à transformateur, de 0,3 d'épaisseur.

Actuellement, on emploie trois sortes d'acier, l'acier laminé à chaud, laminé à froid et à grains orientés.

Pour isoler les tôles, on utilise le vernis.

Les tôles utilisées à l'Electro-industrie pour le circuit magnétique, sont livrées sous forme de rouleaux de 800mm de largeur, et de 0,3 mm d'épaisseur.

Elles sont revêtues d'une couche de carliste et sont fortement isolées afin d'éviter tout incident pouvant endommager leurs formes et diminuer leurs propriétés magnétique.

Le circuit magnétique est formé de trois colonnes placées dans un même plan, fermé par deux culasses horizontales (voir figure V.2).

Les tôles sont découpées à 45° pour réduire les pertes dans les coins, Leur assemblage est réalisé à l'aide de quatre ferrures et huit boulons (voir figure V.1).

L'isolation entre le circuit magnétique et les ferrures est assurée par une couche de papier et celle des boulons et les culasses par des rondelles.

### V.2.2 Réalisation des enroulements [6]

#### ❖ Enroulement basse tension

Une fois le choix des conducteurs est fait, on bobine sur un gabarit dont le diamètre extérieur est égal à celui du diamètre intérieur de la bobine basse tension déjà calculé (chapitre II), les deux extrémités du gabarit sont limitées par les cales de progression qui à leurs tour limitent la hauteur de bobinage.

On enveloppe 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 bobinages, droit ou gauche.

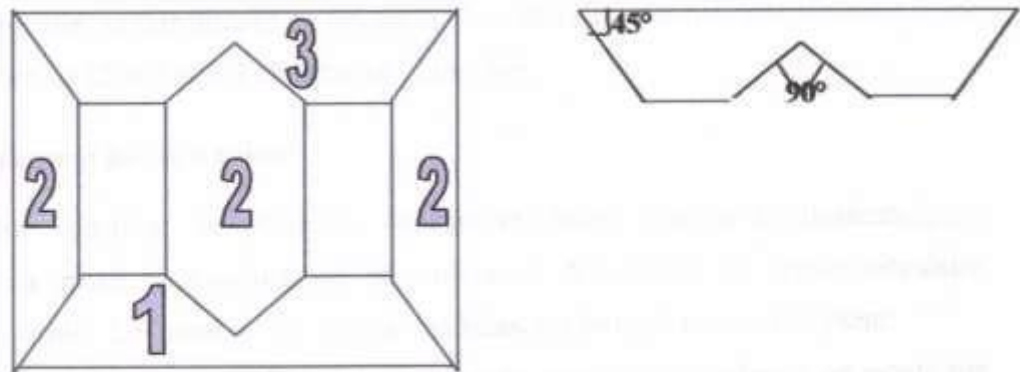


FIG V.1 Disposition des tôles et technique d'empilage [4]

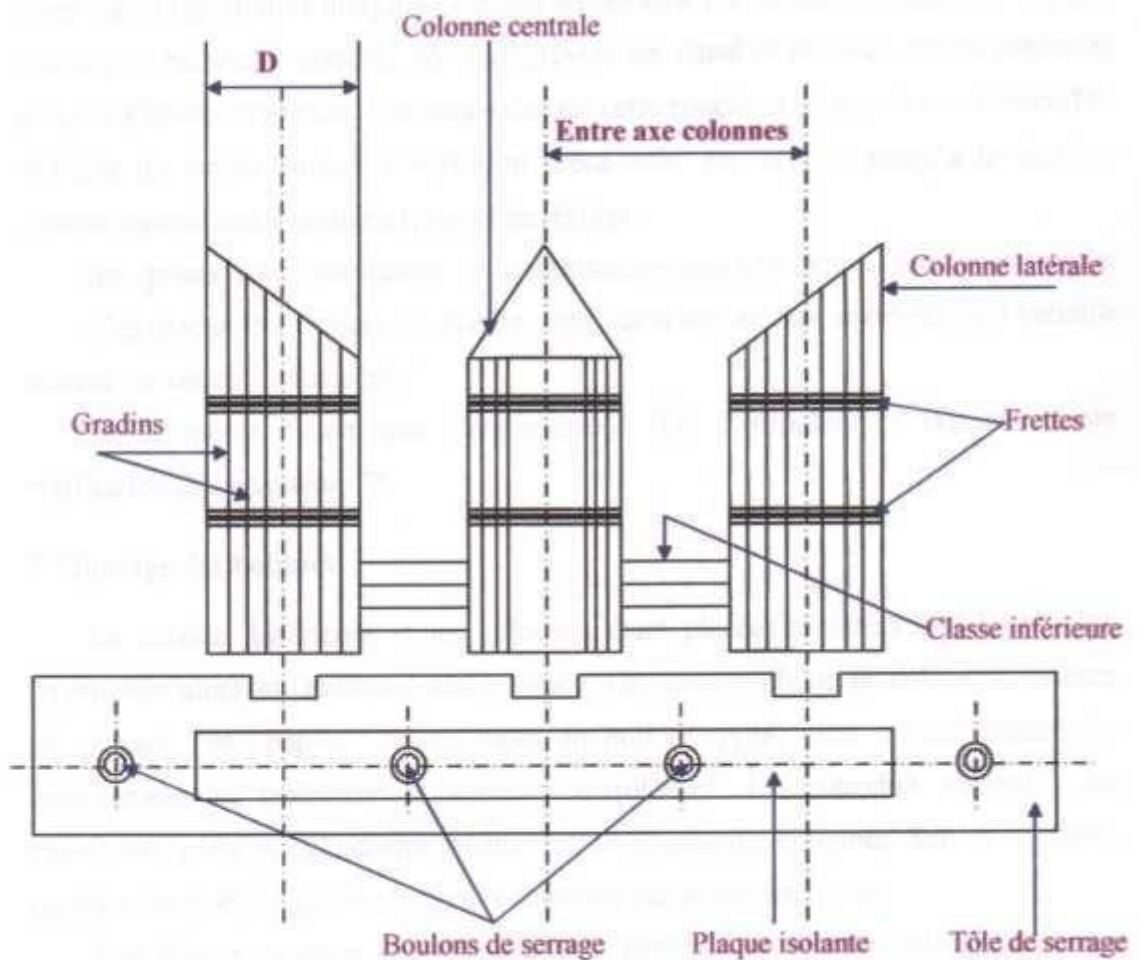


FIG V.2 Montage du noyau [4]

La bobine une fois réalisée doit être pressée pour corriger sa hauteur de montage et pour augmenter sa stabilité .Et en fin, on la place dans un four pendant 12heures à une température de 120c° afin d'en extraire l'humidité.

#### ❖ **Enroulement haute tension**

Il est constitué en plusieurs couches et chaque couche est constituée de plusieurs spires. L'enroulement est réalisé à partir de conducteurs en Aluminium de section circulaire isolée au vernis. Le nombre de spires réalisés est indiqué par un compteur.

Le gabarit approprié à l'enroulement haute tension étant préparé, on monte sur celui-ci un tube en papier bakélite de 6mm d'épaisseur. On coude le bout du fil de bobinage qu'on fixe au gabarit, le bobinage peut donc commencer.

Une fois la première couche terminée, on l'isole avec du papier et on place les cales isolantes (bande marginale) à ses extrémités .La même opération est répétée jusqu'à la huitième couche, on doit prévoir un canal de refroidissement obtenu en plaçant d'abord des cales longitudinales sur cette couche et on enveloppe l'ensemble à l'aide du papier isolant .L'opération précédente est répétée jusqu'à la dernière couche comportant des spires (prises) de réglage.

Ces prises sont connectées au commutateur qui à son tour est fixé au couvercle.

L'épaisseur du papier d'isolation entre couches et aux extrémités est variable suivant les couches considérée.

De la même façon que l'enroulement BT, L'enroulement HT, subira une vérification de la hauteur.

#### ❖ **Montage des bobines**

La culasse inférieure et les colonnes, étant placées et serrées avec les profilés, on procède alors au montage des bobines. On isole d'abord la culasse inférieure en plaçant du papier et des cales en bois (d'appui) pour mieux soutenir les enroulements et maintenir la distance d'isolement. On introduit en suite des cales dites plats au cylindrique au niveau des gradins des colonnes .Sur les colonnes on place les bobines qu'on sépare des colonnes par du papier isolant.

Une fois le montage d'enroulement terminé, on place la culasse supérieure qu'on sépare des bobines de la même manière que pour la culasse inférieure. L'ensemble est fixé avec des pièces de serrage isolées avec du papier.

**V.3 Partie constructive [2]****V.3.1 La cuve**

Elle est destinée à contenir la partie active baignant dans l'huile. Dans le fond de la cuve se trouve un dispositif d'écoulement du liquide de refroidissement et d'isolement. Les parois endurées et les surfaces latérales 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 décevable (partie active+couvercle).

Pour la mise a la terre du transformateur, il y a une vis de terre en bas sur le côté haute tension de la cuve et une vis en haut sur le couvercle de la cuve près de la traversée basse tension.

Le couvercle de la cuve est équipé d'un indicateur de niveau d'huile (magnétique) suffisamment élevé pour garantir un bon niveau d'huile dans les éléments isolants, (voir figure V.3 ).

**V.3.2 Couvercle**

Il est réalisé en acier de nuance A33 de 4mm (<250KVA) d'épaisseur, muni de cavités, de tours et d'autres accessoires pour fixation des appareils de protection et des isolateurs de traversées, qui sont en nombre de trois du coté haute tension (primaire) et de quatre de l'autre coté (secondaire), (voir figure V.4).

**V.3.3 Isolateurs de traversées**

Les traversées sont constituées par un cylindre épais en porcelaine à l'intérieur 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 (voir figure V.5).

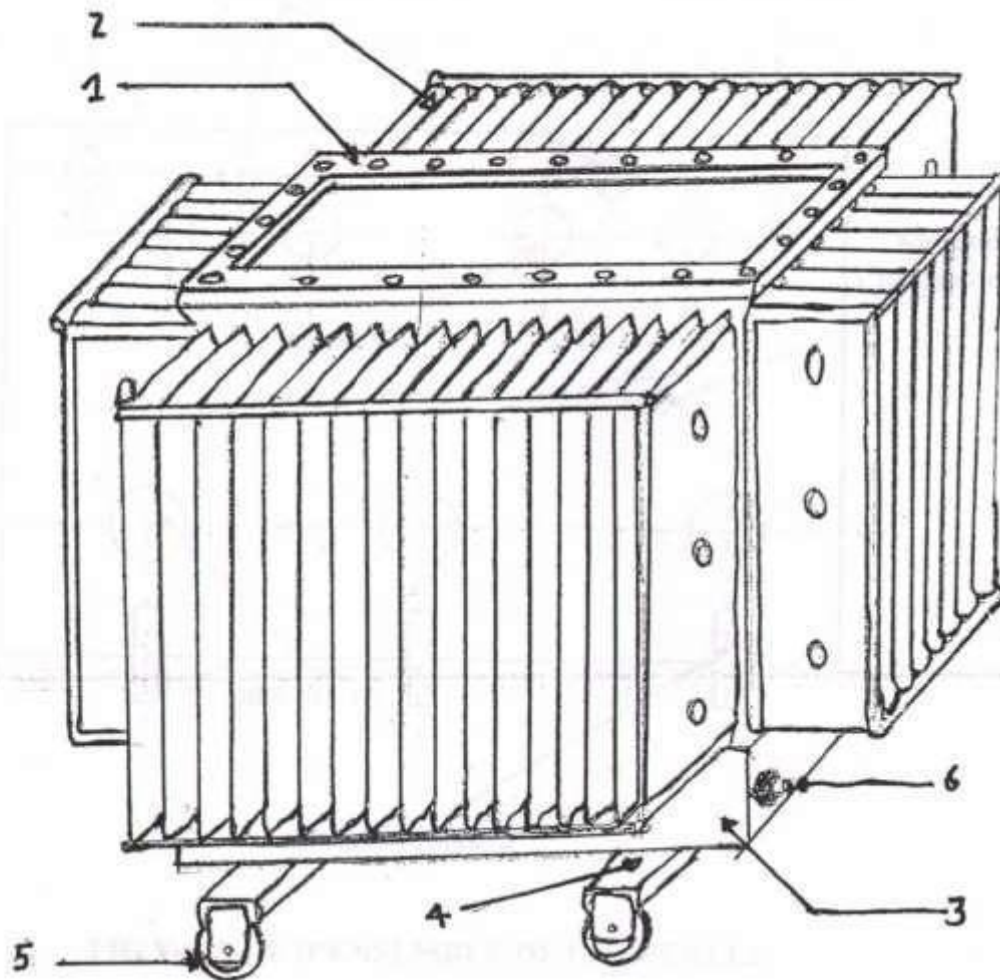
**V.3.4 Le conservateur d'huile**

Il est fixé au couvercle par des éclisses. Un indicateur de niveau d'huile est placé sur une frontale de la conservation et sur l'autre face frontale est soudée une bride à laquelle est boulonnée l'assécheur d'air (voir figure V.6).

**V.3.5 Boulons et tiges**

Les boulons et les tiges prévus sont en acier de nuance A48





- 1- Cadre
- 2- Parois ondulées
- 3- Partie inférieure
- 4- Support
- 5- Galet de roulement
- 6- Bouchon de vidange

Fig V.3 Montage de la cuve [4]

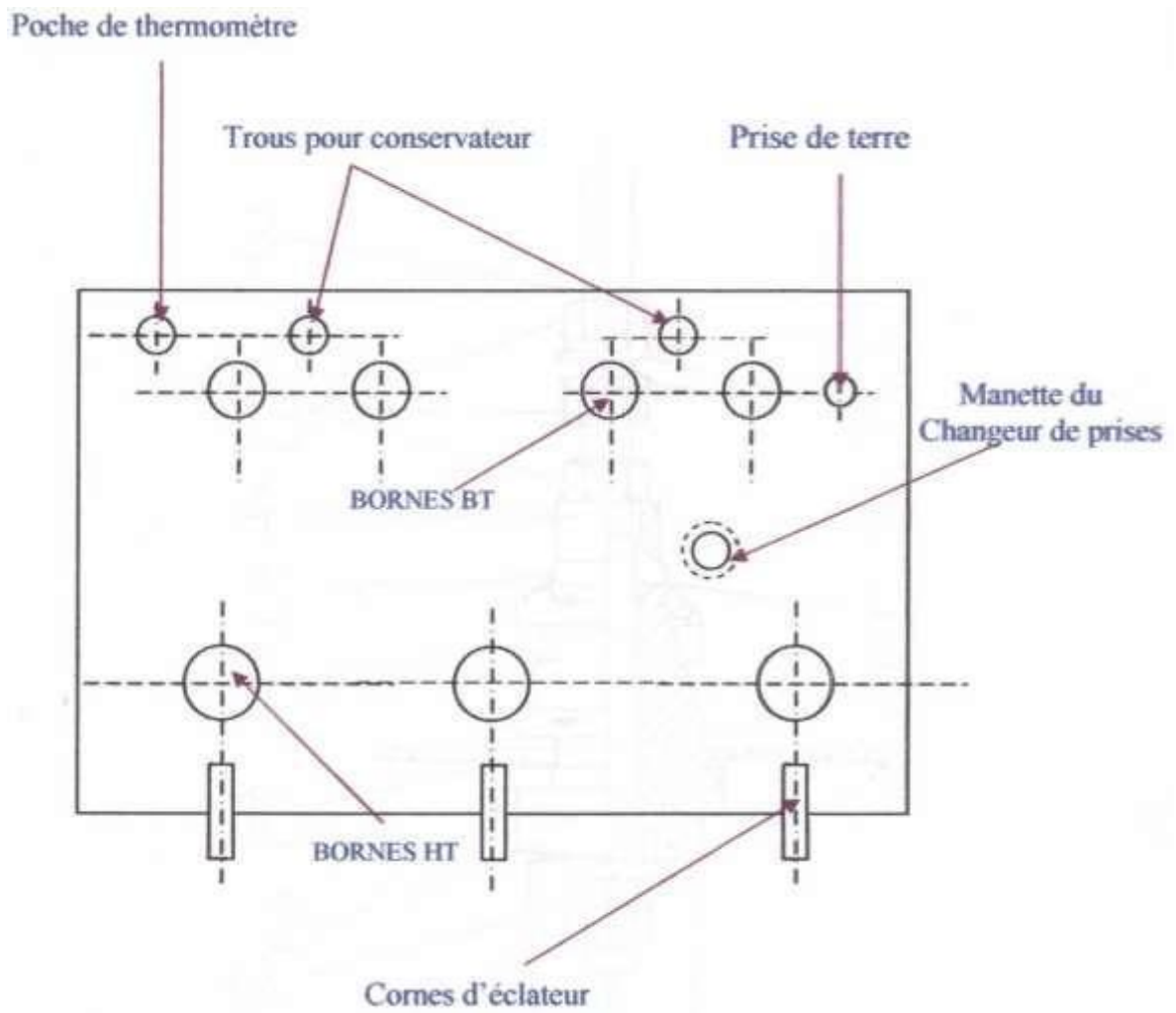
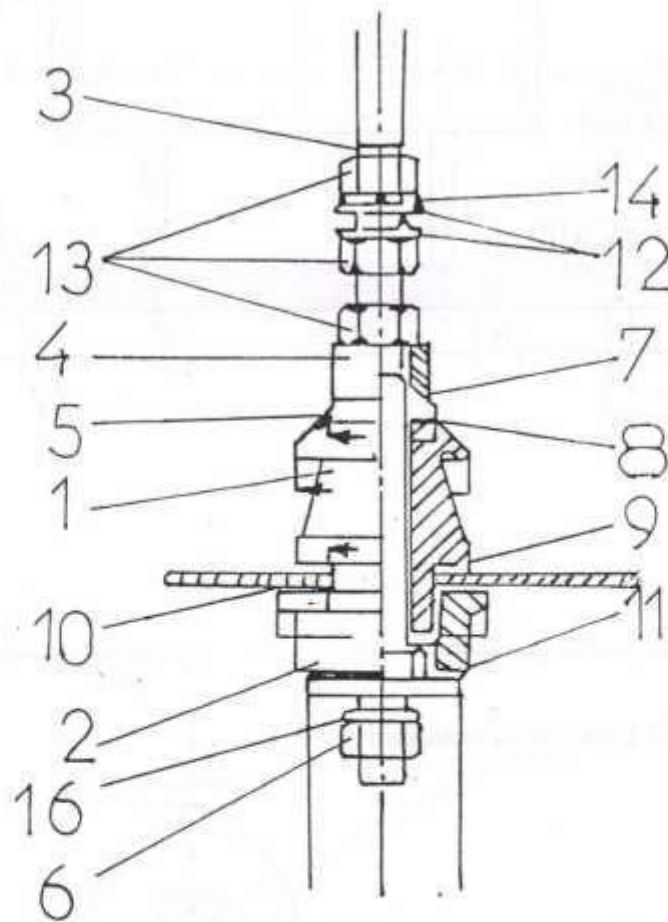


Fig V.4 Vue d'ensemble de couvercle



- 1 – Porcelaine supérieure
- 2 – Porcelaine inférieure
- 3 – Boulon
- 4 – Rondelle
- 5 – Rondelle

- 6 – Ecrou
- 7 – Joint d'étanchéité
- 8 – Joint plat
- 9 – Joint plat
- 10 – Joint Plat

- 11 – Joint plat
- 12 – Rondelle
- 13 – Ecrou
- 14 – Rondelle
- 16 – Ressort

Fig V.5 Traversée

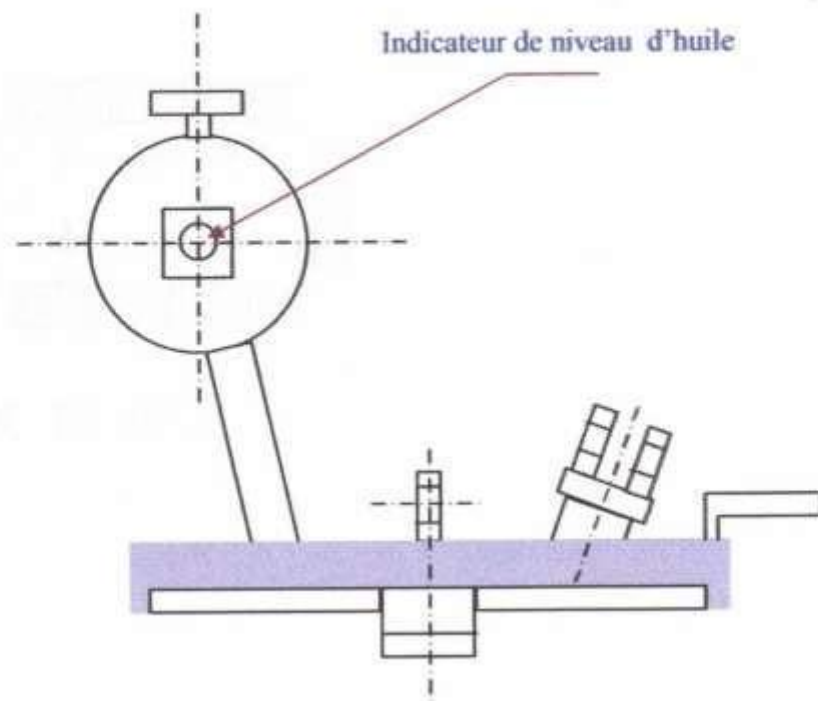
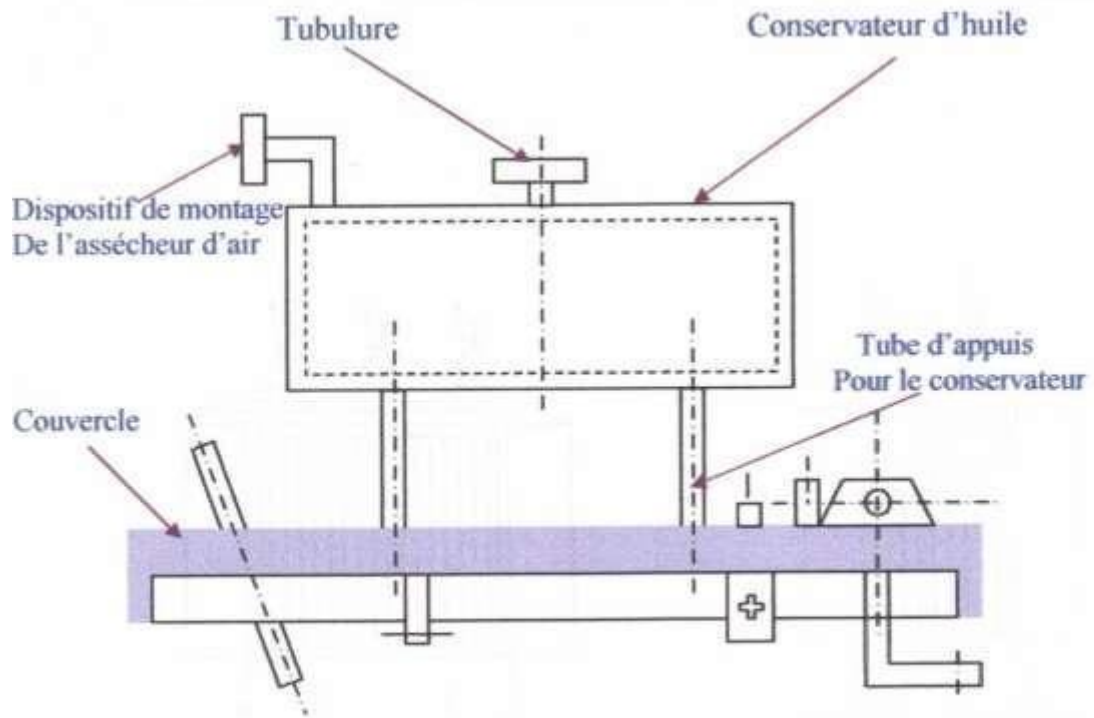
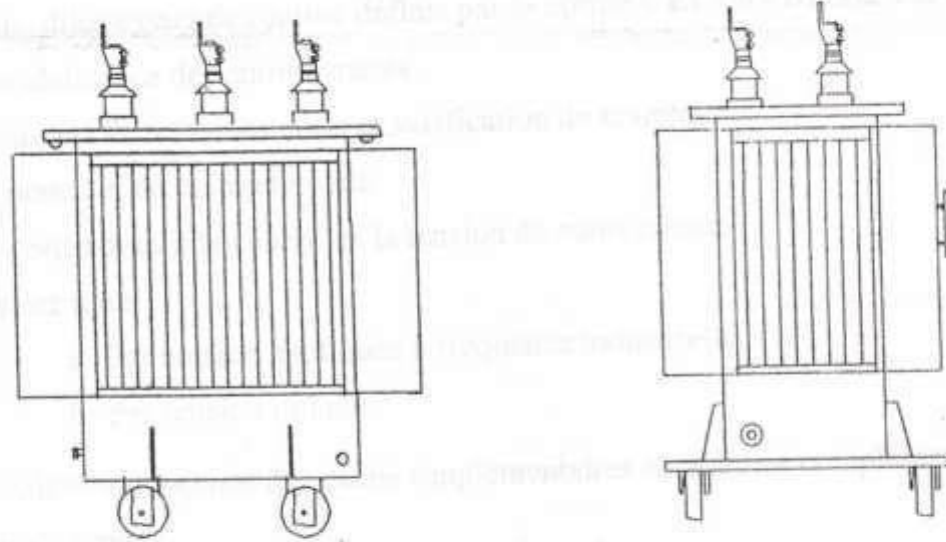
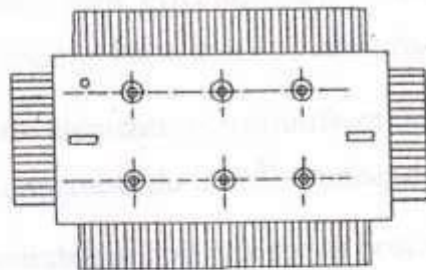


Fig V.6 Conservateur d'huile



VUE DE FACE

VUE DE GAUCHE



VUE DE DESSUS

Fig V.7 Représentation générale du transformateur

# Conclusion générale

## Conclusion générale

Le travail qui nous a été proposé est la conception d'un transformateur de puissance apparente nominale  $S_n = 630$  kVA, ce mémoire nous a permis d'approfondir et d'enrichir nos connaissances dans le domaine d'électrotechnique en général, et en particulier dans la technologie de fabrication des transformateurs.

Cette étude nous a permis de vérifier les résultats théoriques en particulier l'intérêt de l'utilisation des équations de Maxwell dans la modélisation moderne des systèmes électromagnétiques.

L'exploitation réelle du transformateur au sein de l'entreprise d'électro-industriel d'AZAZGA où nous avons eu l'honneur d'effectuer notre stage, nous a permis de prendre connaissance approfondie du processus de fabrication dans ces différentes étapes et de nous familiariser avec le milieu industriel.

Enfin nous espérons que notre travail sera une base pour une étude complémentaire des parties mécaniques et thermiques que nous n'avons pas pu malheureusement traiter.

# Bibliographie



## **Bibliographie**

- [1] F. Milsant « Electrotechnique : Machines électriques », Editions Berti.
- [2] S.Belarif, A.Chemani et H.Bouzeboudja « Etude comparative entre transformateur bobinage en cuivre et bobinage en Aluminium », Mémoire de fin d'études ingénieur, université de Tizi-Ouzou, 2007.
- [3] R.Samer, Y.Negab « Etude d'optimisation d'un transformateur a remplissage intégrale, type embrochable 250kVA, 10kV/0,4kV », Mémoire de fin d'études ingénieur, université de Tizi-Ouzou, 2007.
- [4] Norme Internationale, Document ELECTRO-INDUSTRIE, AZAZGA.  
(CEI 78)
- [5] J-L Dalmasso « Cours d'électrotechnique », Tome 2, Traitement de l'énergie électrique, Editions Belin, 1984.
- [6] A. Fouillé « Electrotechnique à l'usage des ingénieurs », Tome 2, Machines électriques, 7ème édition, Editions Dunod, Paris 1966.
- [7] N. Bouaziz « Modélisation par élément finis d'un transformateur de puissance », Mémoire de fin d'études ingénieur, université de Tizi-Ouzou, 2005.
- [8] A. Guilbert « circuits magnétiques a flux alternatifs. Transformateurs », Editions 1973.