

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU  
FACULTÉ DES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR  
INSTITUT D'ELECTROTECHNIQUE

# MEMOIRE



## De fin d'étude

En vue d'obtention du diplôme

**D'ingénieur d'état en Electrotechnique**

Option : Machines électriques

**THEME**

Etude du fonctionnement  
et calcul d'un transformateur  
triphase à trois enroulements  
1250KVA, 30KV/690V/690V

Proposé par :  
**M<sup>r</sup> DJ.BELKACEMI**  
(Electro-Industries)

Dirigé par :  
**M<sup>r</sup> M .SADOK**  
**M<sup>r</sup> DJ.BELKACEMI**

Etudié par :  
**M<sup>elle</sup> DJ.AMIRAT**  
**M<sup>elle</sup> GH.BENDIDA**  
**M<sup>elle</sup> O.MANSERI**

Promotion 2009

# REMERCIEMENTS

Nous louons Dieu de nous avoir donné le courage et la santé pour mener ce modeste travail à terme.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre promoteur M<sup>r</sup> M. SADOK (enseignant à l'université MOULOUD MAMMERI de Tizi-Ouzou) pour ses conseils judicieux et sacrifice.

Nos remerciements les plus distingués vont également à M<sup>r</sup> Dj. BELKACEMI (chef du département technique unité transformateur de l'ENEL) sans oublier tout le personnel du bureau d'étude pour leur disponibilité.

Aux membres du jury qui feront l'honneur de juger notre travail. Que tous les enseignants ayant contribué à notre formation trouvent ici nos profondes reconnaissances.

Enfin, nous tenons à exprimer toutes nos gratitudees à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

# Dédicaces

## Je dédie ce modeste travail à :

- Mes très chers parents, en témoignage d'affection et de reconnaissance pour leurs sacrifices, encouragements, et soutiens durant tous mon cursus.
- Mes très chers frères Yazid et Hamza.
- Ma sœur Nouara, son mari Hacem, et leurs adorables (Melissa et Mayas).
- Ma sœur Dalila son mari Youcef, et leurs anges (Yanis et Léna).
- Ma sœur Kahina, son mari Nassim, et leurs fillettes (Selma et Imane).
- Mes très chères sœur Lyla et Safia, je leurs souhaite une bonne réussite.
- Ceux qui me sont chers de cœur et de sang, et ceux qui luttent pour une cause noble et juste, et croient à la réussite.

**DJOUHRA**

# Dédicaces

**Je dédie ce modeste travail**

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

**A mes très chers frères Mohamed, Abdelhak, Khaled, Adlane**

**A mes très chères sœur Lynda, Asmaa**

**A mes oncles et leurs femmes surtout Nacer et sa femme Nora**

**A mes grands parents**

**A ma très chère Ouardia**

**A ma très chère Souad**

**A mon ange Mimi**

**A tous mes amis (es)**

**A tous ceux qui me sont chers de cœur**

**GHANIA**

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à ma chère mère et mon cher père qui m'ont élevé, formé, encouragé, et soutenu durant toute ma vie.*

*A la mémoire de ma sœur Louiza*

*A mon frère Mouhand Saïd et sa femme Amina, A l'adorable petit Zin dine*

*A mon frère Mokrane et sa fiancée Taous*

*A ma très chère sœur Farida*

*A ma très chère sœur Sonia, son fiancé Kader*

*A ma très chère sœur Nacira, son mari Kamal*

*A ma très chère sœur Karima, son mari Bousad, A l'aimable bébé Lycia*

*A ma très cher sœur Rouza, son mari Saïd et ses enfants:*

*Ghilas, Thiziri,*

*Ismail et Nawal*

*A mon cher ami Djilali*

*A mes très chères copines : Taous, Yamina, Mounia,*

*Karima,*

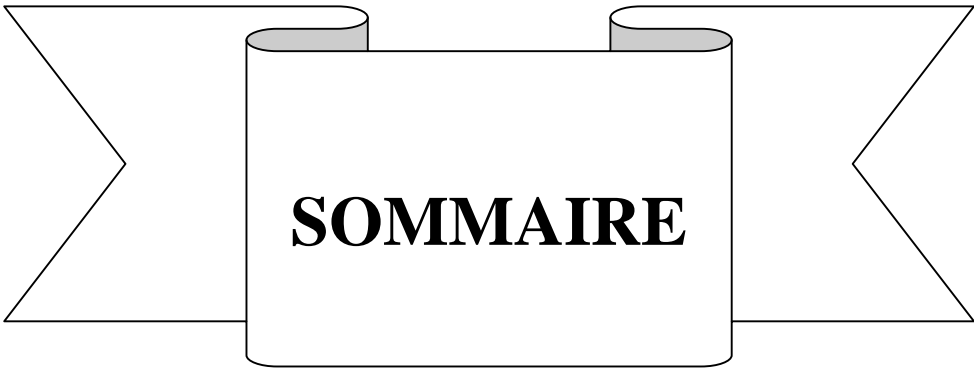
*Nassima, Salma*

*A tous ceux qui me sont chers de cœur*

**OUIZA**

# Cahier des charges

- Puissance nominale  $S_n = 1250kVA$
- Tension nominale primaire  $U_{n1} = 30kV$
- Couplage primaire Triangle
- Tension nominale secondaire  $U_{n2} = 690V$
- Couplage secondaire Etoile
- Tension nominale tertiaire  $U_{n3} = 690V$
- Couplage tertiaire Triangle
- Indice Horaire 11
- Tension de court circuit à 75°C  $U_{cc12} = 6\% \pm 10\%$
- Tension de court circuit à 75°C  $U_{cc13} = 17\%$
- Tension de court circuit à 75°C  $U_{cc23} = 10\%$
- Pertes en charge à 75°C  $P_{cc} = 14000W + 15\%$
- Pertes à vide  $P_0 = 2150W + 15\%$
- Fréquence  $f = 50Hz$
- Courant à vide  $I_0 = 1,31\%$



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

## **Chapitre I : Généralités et fonctionnement du transformateur à trois enroulements**

I.1. Définition et principe de fonctionnement .....	2
I.2. Constitution .....	2
I.2.1. Partie active .....	3
I.2.2. Partie constructive .....	5
I.3. Couplages- Rapport de transformation- Indice horaire .....	6
I.3.1. Couplages des enroulements .....	7
I.3.2. Rapport de transformation .....	7
I.3.3. Indice horaire -Groupe de couplage.....	7
I.4. Pertes dans le transformateur .....	7
I.4.1. Pertes fer .....	7
I.4.2. Pertes joule .....	9
I.5. Etude de fonctionnement .....	9
I.5. Etude de fonctionnement par la méthode des inductances des fuites partielles ...	9
I.6. Etude de fonctionnement par la méthode des inductances mutuelles .....	22

## **Chapitre II : Calcul électromagnétique**

II.1. Calculs préliminaires des dimensions principales.....	38
II.1.1. Puissance apparente par colonne.....	38
II.1.2. Tensions dans les enroulements .....	38
II.1.3. Courants dans les enroulements.....	40
II.1.4. Tension de court circuit.....	41
II.1.5. Diamètre de la colonne.....	42
II.1.6. Diamètre de canal de fuites.....	46
II.1.7. Hauteur approximative des enroulements.....	47
II.2. Calcul des enroulement.....	47
II.2.1. Tension de spire.....	47
II.2.2. Nombres de spires.....	47
II.2.3. Choix des conducteurs et du type d'enroulement tertiaire.....	49
II.2.4.Choix des conducteurs et du type d'enroulement secondaire.....	52
II.2.5.Choix des conducteurs et du type d'enroulement secondaire.....	54
II.2.6.Dimensionnement radial des enroulements.....	60
II.3. Dimensionnement du circuit magnétique.....	61
II.3.1. Nombre et dimension des gradins.....	61
II.3.2. Longueur de la fenêtre.....	61
II.3.3. Hauteur de la fenêtre.....	62
II.3.4. Hauteur du noyau.....	62
II.3.5. Longueur entre axes des colonnes.....	62
II.3.6. Longueur du noyau.....	62

II.3.7. Section de la culasse.....	62
------------------------------------	----

## **Chapitre III : Calcul des pertes, chute de tension, rendement et courant à vide**

III-1- Pertes à vide.....	66
III-1-1- Poids du noyau.....	66
III-1-2- Pertes dans le noyau.....	67
III-1-3- Pertes supplémentaires.....	68
III-1-4- Pertes fer totales.....	68
III-2- Pertes joule.....	68
III-2-1- Résistances des enroulements.....	69
III-2-2- Perte dans l'enroulement tertiaire.....	69
III-2-3- Perte dans l'enroulement secondaire.....	69
III-2-4- Perte dans l'enroulement primaire.....	70
III-2-5- Perte dans la cuve.....	76
III-2-6- Pertes joule totales.....	77
III-2-7- Tensions de court –circuit.....	78
III-3- Chutes de tension.....	80
III-3-1- Chutes de tension secondaire.....	81
III-3-2- Chutes de tension tertiaire.....	81
III-4- Rendement.....	81
III-5- Courant à vide .....	82

## **Chapitre IV : Calcul thermique**

IV-1- Echauffement du circuit magnétique.....	83
IV-2- Echauffement des enroulements.....	86
IV-2-1- Echauffement de l'enroulement tertiaire par rapport à l'huile.....	87
IV-2-2- Echauffement de l'enroulement secondaire par rapport à l'huile.....	91
IV-2-3- Echauffement de l'enroulement primaire par rapport à l'huile.....	95

## **Chapitre V : Dimensionnement de la cuve**

V-1- Paramètres géométriques.....	98
V-1-1- Longueur de la cuve.....	98
V-1-2- Largeur de la cuve.....	98
V-1-3- Hauteur de la cuve.....	98
V-1-4- Dimensionnement des ondulations.....	99
V-1-5- Détermination du nombre d'ondulations.....	102
V-2- Pertes dissipées par la cuve et le couvercle.....	104
V-2-1- Pertes dissipées par la cuve .....	104
V-2-2- Pertes dissipées par le couvercle.....	105

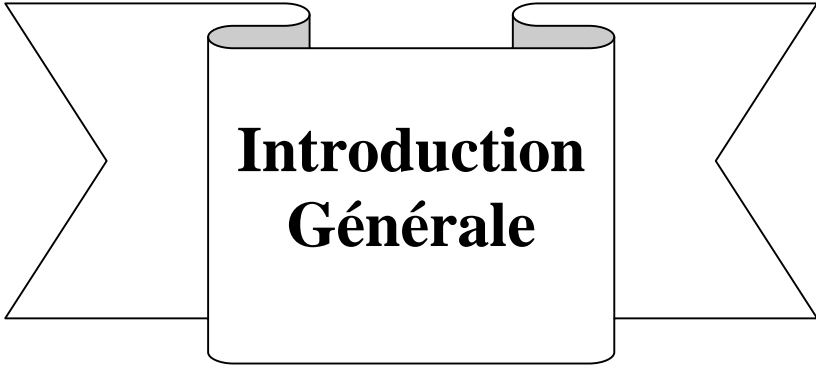
V-3- Echauffements dans le transformateur.....	107
V-3-1- Echauffements de l'huile par rapport à la cuve.....	107
V-3-2- Echauffements de la cuve par rapport à l'aire.....	108
V-3-3- Température du circuit magnétique.....	108
V-3-4- Température des enroulements.....	108
V-4- Volume de l'huile.....	108
V-4-1- Volume de la cuve sans ondulations.....	108
V-4-2-Volume des ondulations.....	109
V-4-3-Volume de la partie décuvable.....	109
V-4-4-Volume de l'huile.....	110
V-5-Poids du transformateur.....	110
V-5-1-Poids de la cuve .....	110
V-5-2-Poids du couvercle.....	111
V-5-3-Poids de la partie décuvable.....	111
V-5-4-Poids de l'huile.....	112
V-5-5-Poids total du transformateur.....	112

## **Chapitre VI : Calcul mécanique**

VI-1Intensité de courant de court circuit.....	113
VI-1-1-Valeurs maximales des courants de court-circuit.....	113
VI-1-2-Efforts électrodynamiques.....	114
VI-2-Calcul des parties constructives.....	118
VI-2-1-Ferrures de serrage.....	118
VI-2-2-Tiges de serrage.....	119
VI-2-3-Tirants de serrage.....	120

## **Conclusion générale**

## **Bibliographie**



**Introduction  
Générale**

## INTRODUCTION GENERALE :

Il est difficile d'imaginer le monde d'aujourd'hui sans l'électricité. Les applications de l'électricité sont toujours plus nombreuses, accompagnant des nouvelles inventions et les avancés technologiques. En conséquence, la production et la consommation d'électricité augmentent chaque année.

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

Les transformateurs sont d'importants composants des réseaux électriques, l'un des dispositifs importants, pour l'exploitation de cette énergie électrique.

Les transformateurs sont des appareils qui servent à modifier, transformer les caractéristiques de courant et de tension de l'énergie électrique existant sous forme alternative, c'est des appareils passifs, ils transmettent la puissance sans changer la valeur, c.a.d que s'ils augmentent la tension, ils abaissent le courant, et vis-vers-ça.

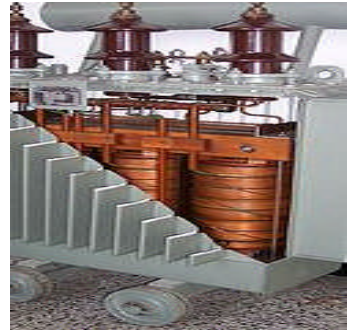
On distingue plusieurs types de transformateurs : les transformateurs de puissance, d'essai, spéciaux .....etc.

Le but de ce travail est de montrer l'intérêt que porte ce type de transformateur par rapport aux transformateurs classiques, à savoir, l'avantage économique qu'il présente vu qu'il possède deux secondaires, ce qui nous permet de le faire fonctionner à la place de deux transformateurs à deux enroulements.

La fabrication d'un transformateur est basée sur plusieurs conceptions qui dépendent de cahier des charges que le client impose. Nous nous sommes intéressés à faire une étude sur un transformateur triphasé à trois enroulements, de puissance apparente de 1250 kVA, proposé par un client à l'ELECTRO-INDUSTRIE d'AZAZGA.

Dans le cadre de ce travail, six chapitres seront présentés :

- ❖ Chapitre I : Définitions, et étude théorique.
- ❖ Chapitre II : Calcul électromagnétique.
- ❖ Chapitre III : Calcul des pertes, chute de tension et rendement.
- ❖ Chapitre IV : Calcul thermique.
- ❖ Chapitre V : Dimensionnement de la cuve.
- ❖ Chapitre VI : Calcul mécanique.



**Chapitre I :  
Généralités et  
fonctionnement d'un  
transformateur à trois  
enroulements**

## I-1-Définition et principe de fonctionnement [3], [4]

Les transformateurs sont des machines statiques à induction électromagnétique destinée à transformer un système de courants variables en un ou plusieurs systèmes de courants variables d'intensité et de tension généralement différentes, mais de même fréquence.

Le nombre d'enroulements d'un transformateur peut donc être quelconque dans le cas général; dans notre cas on examinera seulement le transformateur à trois enroulements (Fig. I-1). Ainsi, un transformateur à tensions  $U_1/U_2/U_3$  est appelé transformateur à trois enroulements, il est utilisé actuellement dans les sous stations, pour la connexion d'un réseau primaire à deux réseaux : secondaire et tertiaire.

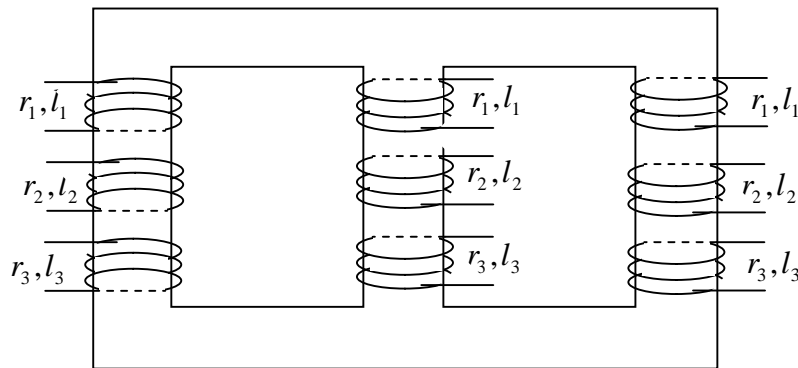


Figure I-1 : Schéma de principe d'un transformateur 3~ à 3 enroulements.

### I-1-2-Principe de fonctionnement

Un transformateur monophasé à trois enroulements est constitué d'un circuit ferromagnétique fermé portant trois enroulements sans liaison conductrice.

Le premier enroulement, nommé primaire, est alimenté par une source de tension alternative ; un flux magnétique forcé s'établit dans le circuit magnétique. Le deuxième enroulement appelé secondaire embrasse un flux mutuelle variable et devient le siège d'une f.e.m induite  $e_2$ , celle-ci induira un courant alternatif dans les récepteurs d'énergie électrique connectés à ses bornes. Le troisième enroulement est le tertiaire ; il embrasse aussi un flux mutuel variable et devient le siège d'une f.e.m induite  $e_3$  qui alimente des récepteurs d'énergie électrique

## I-2-Constitution d'un transformateur [3], [7]

Le transformateur comporte deux parties essentielles :

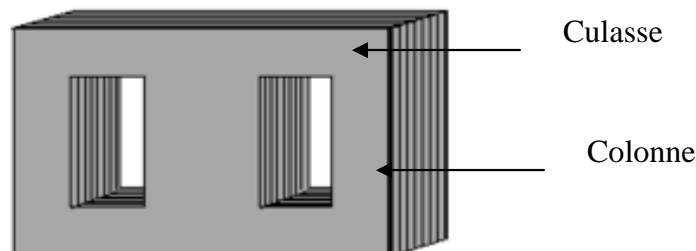
- La partie active.
- La partie constructive.

### I-2-1-Partie active

#### I-2-1-1-Circuit magnétique

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

La fonction principale du circuit magnétique est de canaliser le flux magnétique, mais elle sert aussi comme support aux enroulements. Ce circuit magnétique comporte trois colonnes réunies par deux culasses (Fig. I-2).



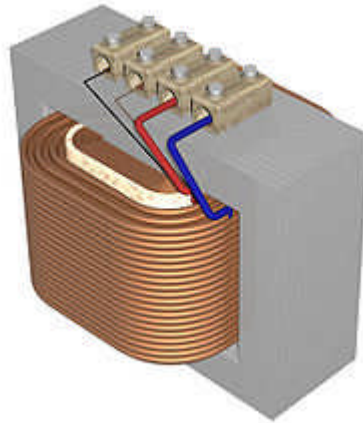
**Figure : I-2-Circuit magnétique.**

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

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

### I-2-1-2-Les enroulements

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



**Figure : I-3-L'enroulement**

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

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

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

- Enroulements concentriques en couche en fil 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-2-2-Partie constructive**

### **I-2-2-1-Cuve et couvercle**

Afin d'améliorer l'isolement et le refroidissement de la partie active du transformateur ainsi que la protection mécanique de celui-ci, l'ensemble (circuit magnétique et enroulements) est placé dans une cuve remplie d'huile minérale pour transformateur.

La cuve doit être intégralement remplie d'huile et hermétiquement fermée, sinon elle serait détruite à cause de la pression qui s'y développe par suite de l'augmentation du volume d'huile à cause du changement de température.

La partie supérieure de la cuve est fermée par un couvercle, d'où la nécessité d'un joint étanche qui sert, par ailleurs, comme support aux accessoires suivants :

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

### **I-2-2-2-Les traversées**

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

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

### **I-2-3-Le liquide diélectrique**

C'est un mélange d'hydrocarbures provenant de la distillation du pétrole brut, après extraction des produits volatiles.

On obtient ainsi l'huile pour transformateurs, qui est un liquide dont l'immersion de la partie active présente non seulement l'avantage d'une meilleure isolation, mais aussi celui de la facilité de refroidissement par circulation naturelle de l'huile.

### I-2-4-La protection des transformateurs

Le transformateur peut être confronté à de nombreux défauts pouvant produire un vieillissement prématuré ou une destruction immédiate de son matériel, donc des mesures de sécurité doit être mises en place pour assurer le contrôle ainsi que l'interruption des dysfonctionnements.

## I-3-Couplage-rapport de transformation- indice horaire [2], [3]

### I-3-1-Le couplage

Les enroulements primaires et secondaires sont couplés en étoile, en triangle ou en zigzag.

Si on indique par Y, D, et Z les couplages respectivement en étoile, en triangle, et en zigzag des enroulements HT ; par y, d, et z les couplages respectivement en étoile, en triangle, et en zigzag des enroulements BT, neuf couplages sont possibles, mais les seuls à retenir sont :  $Yy, Yd, Yz, Dd, Zy, Dy$ .

Le cahier des charges exige que les enroulements HT (primaire) et BT (tertiaire) soient couplés en triangle ; alors que l'enroulement BT (secondaire) doit être couplé en étoile (Fig. I-4).

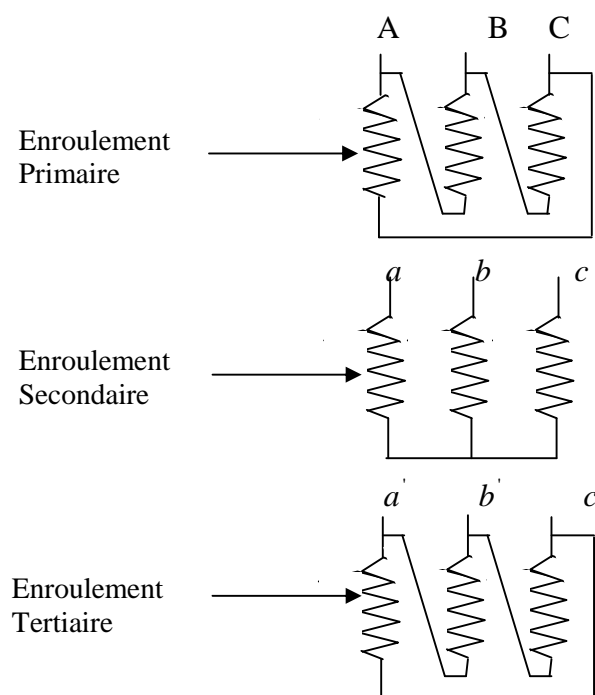


Figure I-4 : Les différents couplages des enroulements

### **I-3-2-Indice horaire h**

L'indice horaire est le nombre entier h (compris entre 0 et 11) défini par le rapport suivant :

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

Avec :  $\theta > 0$  dans le sens horaire, étant le déphasage entre les tensions simples primaire et secondaire homologues, où la tension simple primaire est l'origine des phases.

$h$  : dépend du mode de couplage, du sens d'enroulement des bobinages, de la permutation des tensions d'alimentation.

Dans notre cas  $h = 0$  (couplages Dd) et  $h = 11$  (Couplages Dy).

### **I-3-3-Rapport de transformation**

On désigne le rapport de transformation par le rapport des nombres de spires entre les enroulements secondaire et primaire ( $K_{21} = \frac{n_2}{n_1}$ ), ou bien entre l'enroulement tertiaire et

primaire ( $K_{31} = \frac{n_3}{n_1}$ ).

Le rapport de transformation dépend des nombres de spires et du couplage des enroulements : primaire, secondaire et tertiaire.

## **I-4-Pertes magnétiques dans le transformateur [4], [5], [10]**

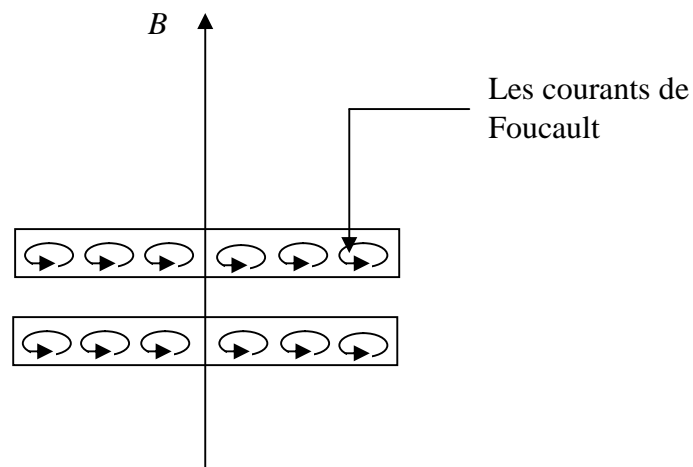
On sait que toute variation d'induction dans un matériau magnétique implique à l'intérieur de celui-ci une dissipation apparaissant le plus souvent sous forme de chaleur non récupérable, d'où l'expression des pertes magnétiques pour désigner le phénomène. Ces pertes sont mesurées par un appareil qui s'appelle cadre d'EPSTEIN. On va citer les différents types suivants.

### **I-4-1-Pertes fer**

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

- **Les pertes par courant de Foucault  $P_{cf}$  :**

Les matériaux ferromagnétiques ont souvent des propriétés conductrices du courant électrique. En présence d'un flux variable ils sont le siège de courants induits qui circulent dans la masse même de ces matériaux (Fig. I-5). L'effet joule dissipe l'énergie sous forme de chaleur appelée « pertes classiques par courant induit ».

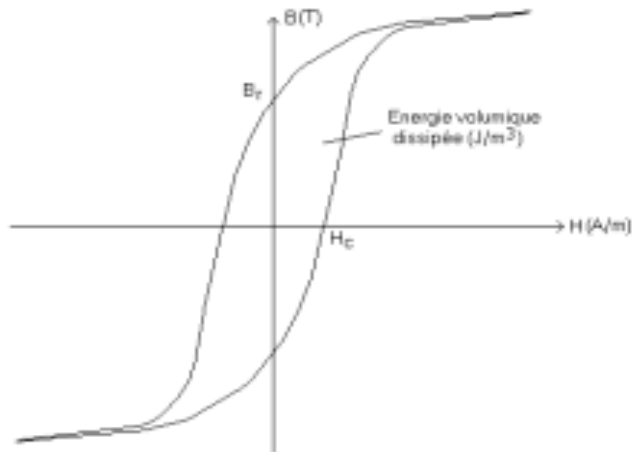


**Figure I-5 : Les courants de Foucault.**

- **Les pertes par hystérésis  $P_H$  :**

Elles sont dues au travail des forces de freinage agissant sur les parois de Bloch en mouvement durant les processus d'aimantation et de désaimantation.

Ces pertes correspondent au travail  $w = \oint HdB$  nécessaire pour parcourir complètement la boucle d'hystérésis magnétique (Fig. I-5).



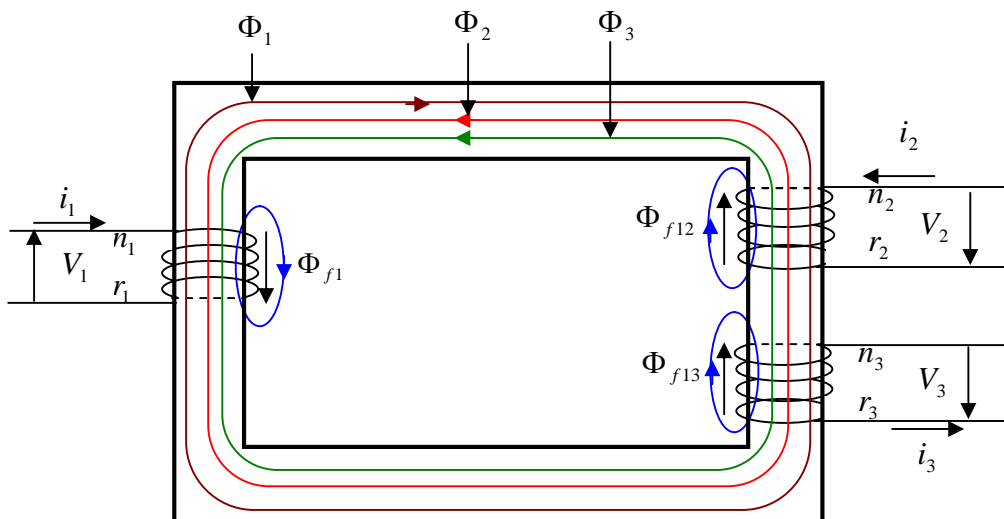
**Figure I-6 : Cycle d'hystérésis.**

### I-4-3-Pertes joules

Le passage du courant dans les enroulements provoque des pertes d'énergie proportionnelles à la résistivité et au volume du conducteur ainsi qu'au carré de la densité du courant.

Le transformateur présente aussi des pertes dans les connections et des pertes par effet pelliculaires.

### I-5-Etude du fonctionnement par les inductances de fuites partielles [1]



**Figure I-7 : Transformateur monophasé à trois enroulements.**

Un transformateur 3~ à trois enroulements est équivalent, du point de vue fonctionnement, à trois transformateurs monophasés identiques, dont les enroulements (primaires, secondaires, et tertiaires) sont couplés en étoile.

L'étude du fonctionnement d'un transformateur triphasé à trois enroulements peut donc se ramener aisément à celle d'un transformateur monophasé à trois enroulements.

Lorsque le primaire est alimenté par une tension alternative  $V_1$ , il en résulte un flux alternatif dans le circuit magnétique. Les flux mutuels couplés avec les enroulements secondaire et tertiaire y induisent des f.e.m.

Nous abordons cette étude à l'aide des inductances de fuites partielles de chaque enroulement. L'enroulement primaire est caractérisé par :  $n_1, r_1, l_1, i_1, v_1$  et  $e_1$  ; l'enroulement secondaire par  $n_2, r_2, l_2, i_2, v_2$  et  $e_2$  ; l'enroulement tertiaire par  $n_3, r_3, l_3, i_3, v_3$  et  $e_3$  (Fig. I-7) ; Ces trois enroulements sont électriquement indépendants.

Chaque *fem* crée un flux total  $\Phi_i$  qui se décompose en un flux  $\Phi$  canalisé par le circuit magnétique, et un flux de fuites  $\Phi_f$  auquel on lui associe une inductance de fuites  $l$  constante. Les enroulements primaires, secondaires et tertiaires ont le même sens d'enroulement.

$$\xi_1 = n_1 \cdot i_1 \quad \text{Crée} \quad \Phi_{t1} = \Phi_1 + \Phi_{f1} \quad \text{avec} \quad l_1 = \frac{n_1 \cdot \Phi_{f1}}{i_1} \quad \text{constante.}$$

$\Phi_1$  : Flux canalisé par le circuit magnétique de réluctance  $\mathfrak{R}$  .

$\Phi_{f1}$  : Flux de fuite auquel on lui associe  $l_1$  : inductance de fuites de l'enroulement primaire.

$$\xi_2 = n_2 \cdot i_2 \quad \text{Crée} \quad \Phi_{t2} = \Phi_2 + \Phi_{f2} \quad \text{avec} \quad l_2 = \frac{n_2 \cdot \Phi_{f2}}{i_2} \quad \text{constante.}$$

$\Phi_2$  : Flux canalisé par le circuit magnétique de réluctance  $\mathfrak{R}$  .

$\Phi_{f2}$  : Flux de fuite auquel on lui associe  $l_2$  : inductance de fuites de l'enroulement secondaire.

$$\xi_3 = n_3 \cdot i_3 \quad \text{Crée} \quad \Phi_{t3} = \Phi_3 + \Phi_{f3} \quad \text{avec} \quad l_3 = \frac{n_3 \cdot \Phi_{f3}}{i_3} \quad \text{constante.}$$

$\Phi_3$  : Flux canalisé par le circuit magnétique de réluctance  $\mathfrak{R}$  .

$\Phi_{f3}$  : Flux de fuite auquel est associée  $l_3$  : inductance de fuites de l'enroulement tertiaire.

### I-5-1-Répartition des flux

Dans un transformateur à trois enroulements comme dans celui à deux enroulements il existe :

- Le flux principal ou le flux d'inductance mutuelle  $\Phi$  embrassé par les trois enroulements du transformateur.

- Les flux de dispersion dont chacun se ferme autour d'un des enroulements.

#### I-5-1-a)-Flux réel dans le circuit magnétique $\Phi$

$$\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3$$

#### I-5-1-b)-Flux réel dans le primaire $\Phi_{r1}$

$$\Phi_{r1} = \Phi_{t1} - \Phi_2 - \Phi_3$$

$$\Phi_{r1} = \Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 + \Phi_{f1}$$

$$\Phi_{r1} = \Phi + \Phi_{f1}$$

#### I-5-1-c)-Flux réel dans le secondaire $\Phi_{r2}$

$$\Phi_{r2} = \Phi_1 - \Phi_{t2} - \Phi_3$$

$$\Phi_{r2} = \Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 - \Phi_{f2}$$

$$\Phi_{r2} = \Phi - \Phi_{f2}$$

#### I-5-1-d)-Flux réel dans le tertiaire $\Phi_{r3}$

$$\Phi_{r3} = \Phi_1 - \Phi_{t3} - \Phi_2$$

$$\Phi_{r3} = \Phi_1 - \Phi_3 - \Phi_2 - \Phi_{f3}$$

$$\Phi_{r3} = \Phi - \Phi_{f3}$$

### I-5-2-Equation des tensions

#### I-5-2-1-Enroulement primaire

$$v_1 - r_1 i_1 - n_1 \frac{d\Phi_{r1}}{dt} = 0$$

$$v_1 = n_1 \frac{d\Phi}{dt} + r_1 i_1 + n_1 \frac{d\Phi_{f1}}{dt}$$

On pose:  $e_1 = n_1 \frac{d\Phi}{dt}$

$$l_1 = n_1 \frac{d\Phi_{f1}}{i_1} \Rightarrow n_1 \Phi_{f1} = l_1 i_1 \Rightarrow n_1 \frac{d\Phi_{f1}}{dt} = l_1 \frac{di_1}{dt}$$

$$v_1 = e_1 + r_1 i_1 + l_1 \frac{di_1}{dt}$$

$e_1$  : Force contre électromotrice.

En complexe:

$$\bar{V}_1 = \bar{E}_1 + r_1 \bar{I}_1 + j l_1 \omega \bar{I}_1$$

Avec:  $\bar{E}_1 = j n_1 \omega \bar{\Phi}$

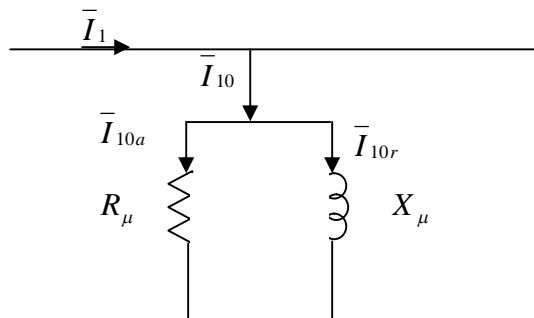
- Introduction des pertes fer et de la puissance magnétisante (Fig. I-8):

$$\bar{E} = R_\mu \bar{I}_{10a}$$

Avec :  $R_\mu$  résistance fictive (absorbe les pertes).

$$\bar{E}_1 = j X_\mu \bar{I}_{10r}$$

Avec :  $X_\mu$  réactance fictive (absorbe la puissance magnétisante).



**Figure I-8 : La branche magnétisante.**

### I-5-2-2-Enroulement secondaire

$$v_2 + r_2 i_2 - n_2 \frac{d\Phi_{r2}}{dt} = 0$$

$$n_2 \frac{d\Phi}{dt} - n_2 \frac{d\Phi_{f2}}{dt} = v_2 + r_2 i_2$$

On pose:  $e_2 = n_2 \frac{d\Phi}{dt}$

$$l_2 = n_2 \frac{d\Phi_{f2}}{i_2} \quad \Rightarrow \quad n_2 \Phi_2 = l_2 i_2 \quad \Rightarrow \quad n_2 \frac{d\Phi_{f2}}{dt} = l_2 \frac{di_2}{dt}$$

$$e_2 = v_2 + r_2 i_2 + l_2 \frac{di_2}{dt}$$

En complexe:

$$\bar{E}_2 = \bar{V}_2 + r_2 \bar{I}_2 + j l_2 \omega \bar{I}_2$$

Avec:  $\bar{E}_2 = j n_2 \omega \bar{\Phi}$

❖ Rapport de transformation secondaire- primaire :

$$\frac{\bar{E}_2}{\bar{E}_1} = \frac{j n_2 \omega \bar{\Phi}}{j n_1 \omega \bar{\Phi}} = \frac{n_2}{n_1} = K_{21}$$

### I-5-2-3-Enroulement tertiaire

$$v_3 + r_3 i_3 - n_3 \frac{d\Phi_{r3}}{dt} = 0$$

$$n_3 \frac{d\Phi}{dt} - n_2 \frac{d\Phi_{f3}}{dt} = v_3 + r_3 i_3$$

On pose:  $e_3 = n_3 \frac{d\Phi}{dt}$

$$l_3 = n_3 \frac{d\Phi_{f3}}{i_3} \quad \Rightarrow \quad n_3 \Phi_3 = l_3 i_3 \quad \Rightarrow \quad n_3 \frac{d\Phi_{f3}}{dt} = l_3 \frac{di_3}{dt}$$

$$e_3 = v_3 + r_3 i_3 + l_3 \frac{di_3}{dt}$$

En complexe:

$$\bar{E}_3 = \bar{V}_3 + r_3 \bar{I}_3 + j l_3 \omega \bar{I}_3$$

Avec:  $\bar{E}_1 = j n_1 \omega \bar{\Phi}$

❖ Rapport de transformation tertiaire- primaire :

$$\frac{\bar{E}_3}{\bar{E}_1} = \frac{j n_3 \omega \bar{\Phi}}{j n_1 \omega \bar{\Phi}} = \frac{n_3}{n_1} = K_{31}$$

### I-5-3-Equation des forces magnétomotrices

$$n_1 \bar{I}_1 - n_2 \bar{I}_2 - n_3 \bar{I}_3 = n_1 \bar{I}_{10}$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{10} + \frac{n_2}{n_1} \bar{I}_2 + \frac{n_3}{n_1} \bar{I}_3$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{10} + K_{21} \bar{I}_2 + K_{31} \bar{I}_3$$

### I-5-4-Schéma équivalent

On néglige  $I_{10}$  devant  $I_1$ , mais on tient compte de ses effets (pertes fer et puissance magnétisants). L'équation des *fmm* prend la forme simplifiée suivante :

- $\bar{I}_1 = K_{21} \bar{I}_2 + K_{31} \bar{I}_3 \dots\dots\dots (1)$

- $V_1 = \bar{E}_1 + r_1 \bar{I}_1 + j l_1 w \bar{I}_1 \dots\dots\dots (2)$

$$\bar{E}_2 = \bar{V}_2 + r_2 \bar{I}_2 + j l_2 w \bar{I}_2$$

$$\frac{\bar{E}_2}{\bar{E}_1} = K_{21} \Rightarrow \bar{E}_2 = K_{21} \bar{E}_1$$

$$\Rightarrow K_{21} \bar{E}_1 = \bar{V}_2 + r_2 \bar{I}_2 + j l_2 w \bar{I}_2$$

$$\bar{E}_1 = \frac{\bar{V}_2}{K_{21}} + \frac{r_2}{K_{21}^2} K_{21} \bar{I}_2 + j \frac{l_2 w}{K_{21}^2} \bar{I}_2$$

- $\bar{E}_1 = \left( \frac{r_2}{K_{21}^2} + j \frac{l_2 w}{K_{21}^2} \right) K_{21} \bar{I}_2 + \frac{\bar{V}_2}{K_{21}} \dots\dots\dots (3)$

$$\bar{E}_3 = \bar{V}_3 + r_3 \bar{I}_3 + j l_3 w \bar{I}_3$$

$$\Rightarrow K_{31} \bar{E}_1 = \bar{V}_3 + r_3 \bar{I}_3 + j l_3 w \bar{I}_3$$

- $\bar{E}_1 = \frac{\bar{V}_3}{K_{31}} + \frac{r_3}{K_{31}^2} K_{31} \bar{I}_3 + j \frac{l_3 w}{K_{31}^2} \bar{I}_3 \dots\dots\dots (4)$

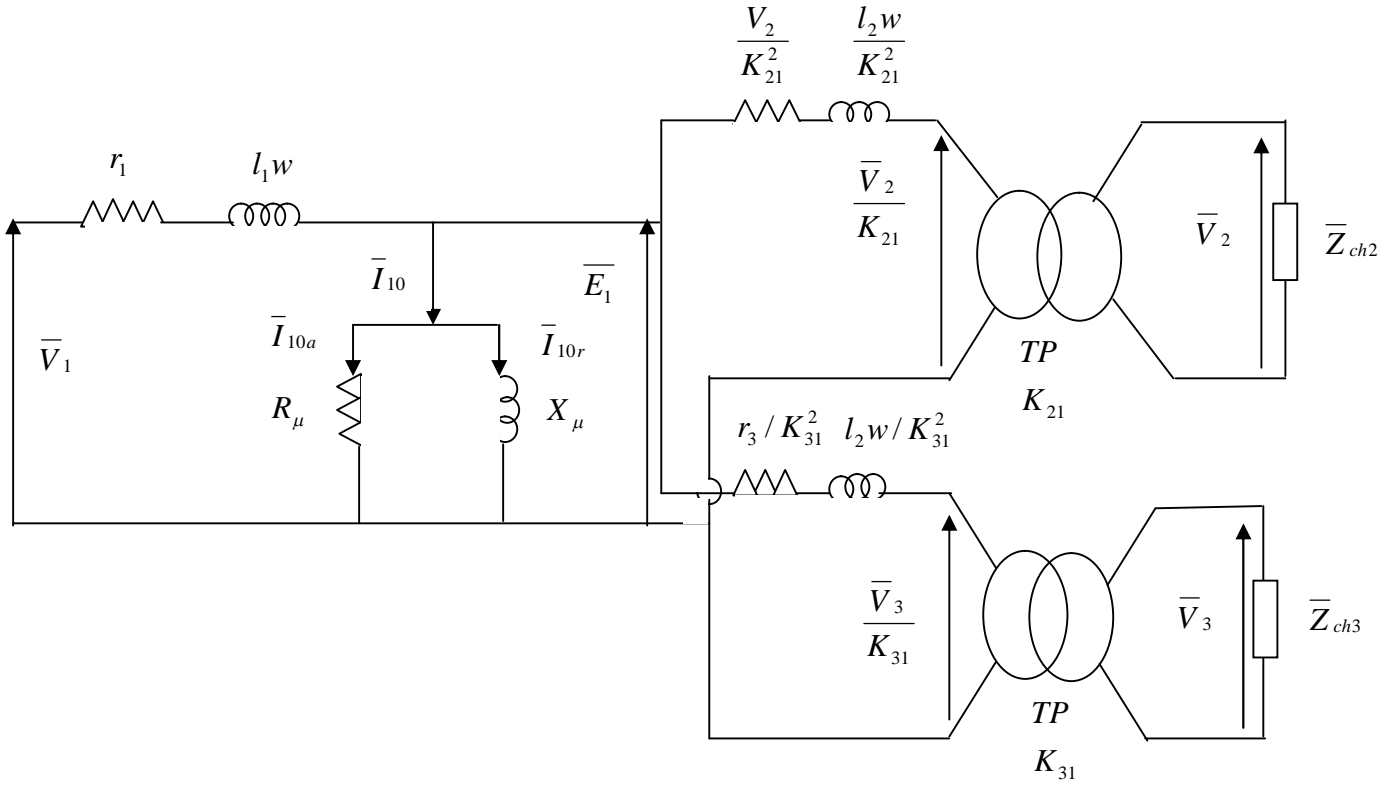


Figure I-9 : Schéma équivalent du transformateur monophasé à trois enroulements.

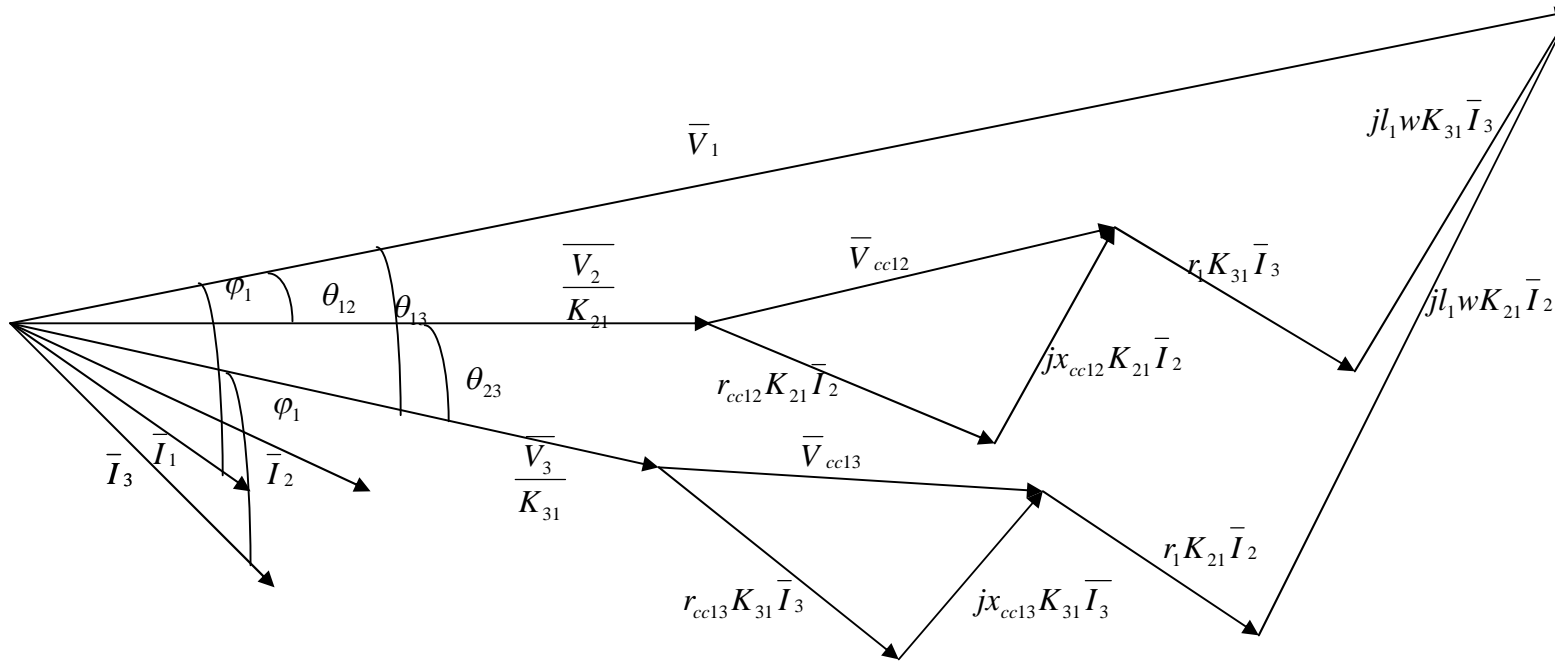
$$\bar{V}_1 = \frac{\bar{V}_2}{K_{21}} + \left( \frac{r_2}{K_{21}^2} + j \frac{l_2 w}{K_{21}^2} \right) K_{21} \bar{I}_2 + r_1 (K_{21} \bar{I}_2 + K_{31} \bar{I}_3) + j l_1 w (K_{21} \bar{I}_2 + K_{31} \bar{I}_3)$$

$$\bar{V}_1 = \frac{\bar{V}_2}{K_{21}} + \left( r_1 + \frac{r_2}{K_{21}^2} \right) K_{21} \bar{I}_2 + j \left( l_1 w + \frac{l_2 w}{K_{21}^2} \right) K_{21} \bar{I}_2 + (r_1 + j l_1 w) K_{31} \bar{I}_3$$

$$\bar{V}_1 = \frac{\bar{V}_3}{K_{31}} + \left( \frac{r_3}{K_{31}^2} + j \frac{l_3 w}{K_{31}^2} \right) K_{31} \bar{I}_3 + r_1 (K_{21} \bar{I}_2 + K_{31} \bar{I}_3) + j l_1 w (K_{21} \bar{I}_2 + K_{31} \bar{I}_3)$$

$$\bar{V}_1 = \frac{\bar{V}_3}{K_{31}} + \left( r_1 + \frac{r_3}{K_{31}^2} \right) K_{31} \bar{I}_3 + j \left( l_1 w + \frac{l_3 w}{K_{31}^2} \right) K_{31} \bar{I}_3 + (r_1 + j l_1 w) K_{21} \bar{I}_2$$

**I-5-5-Diagramme vectoriel**



**Figure I-10 : Schéma vectoriel**

### I-5-6-Tensions de court circuit

On appelle tension de court circuit, la tension réduite qu'il faut appliquer au primaire, pour faire circuler au secondaire (ou au tertiaire) en court circuit, le courant nominal.

#### I-5-6-1-Court circuit secondaire, tertiaire ouvert

$$(\overline{V}_2 = 0, \overline{I}_3 = 0)$$

$$\overline{V}_{cc12} = \left( r_1 + \frac{r_2}{K_{21}^2} \right) K_{21} \overline{I}_{2cc} + j \left( l_1 w + \frac{l_2 w}{K_{21}^2} \right) K_{21} \overline{I}_{2cc}$$

Pour  $I_{2cc} = I_{2n}$

$$\overline{V}_{cc12} = r_{cc12} K_{21} \overline{I}_{2cc} + j x_{cc12} K_{21} \overline{I}_{2cc}$$

$$\begin{cases} r_{cc12} = r_1 + \frac{r_2}{K_{21}^2} \\ x_{cc12} = l_1 w + \frac{l_2 w}{K_{21}^2} \end{cases} \quad \text{et : } \overline{Z}_{cc12} = r_{cc12} + j x_{cc12}$$

D'où

$$\overline{V}_1 = \frac{\overline{V}_2}{K_{21}} + (r_{cc12} + j x_{cc12}) K_{21} \overline{I}_2 + (r_1 + j l_1 w) K_{31} \overline{I}_3$$

Pour  $I_2 = I_{2n}$  :

$$\overline{V}_1 = \frac{\overline{V}_2}{K_{21}} + \overline{V}_{cc12} + (r_1 + j l_1 w) K_{31} \overline{I}_3$$

#### I-5-6-2-Tertiaire en court circuit, secondaire ouvert

$$(\overline{V}_3 = 0, \overline{I}_2 = 0, \overline{V}_{cc13} = 0)$$

$$\overline{V}_{cc13} = \left( r_1 + \frac{r_3}{K_{31}^2} \right) K_{31} \overline{I}_{3cc} + j \left( l_1 w + \frac{l_3 w}{K_{31}^2} \right) K_{31} \overline{I}_{3cc}$$

Pour  $\overline{I}_{3cc} = \overline{I}_{3n}$

$$\begin{cases} r_{cc13} = r_1 + \frac{r_3}{K_{31}^2} \\ x_{cc13} = l_1 w + \frac{l_3 w}{K_{31}^2} \end{cases} \quad \text{et : } \overline{Z}_{cc13} = r_{cc13} + j x_{cc13}$$

$$\overline{V}_{cc13} = r_{cc13} K_{31} \overline{I}_{3cc} + j x_{cc13} K_{31} \overline{I}_{3cc} = \overline{Z}_{cc13} K_{31} \overline{I}_{3cc}$$

$$\bar{V}_1 = \frac{\bar{V}_3}{K_{31}} + (r_{cc13} + jx_{cc13})K_{31}\bar{I}_3 + (r_1 + jl_1w)K_{21}\bar{I}_2$$

### I-5-7-Equations des chutes 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 du type de la charge.

❖ **Côté secondaire :**

$$\Delta V_2 \% = \frac{(V_{20} - V_2)}{V_{20}} 100$$

$$\Delta V_2 \% = \frac{(K_{21}V_1 - V_2)}{k_{21}V_1} 100 = \frac{(V_1 - \frac{V_2}{K_{21}})}{V_1} 100$$

On cherche:  $V_1 - \frac{V_2}{K_{21}}$

$$\bar{V}_1 = \frac{\bar{V}_2}{K_{21}} + (r_{cc12} + jx_{cc12})K_{21}\bar{I}_2 + (r_1 + jl_1w)K_{31}\bar{I}_3$$

$$\bar{V}_2 = V_2$$

$$\bar{I}_2 = I_2 e^{-j\varphi_2}$$

$$\bar{I}_3 = I_3 e^{-j(\varphi_3 + \theta_{23})}, \theta_{23} < \varphi_3$$

$$\bar{V}_1 = V_1 e^{j\theta_{12}} \quad \text{Soit } \bar{I}_3 \approx I_3 e^{-j\varphi_3}$$

$$V_1 \cos \theta_{12} + j V_1 \sin \theta_{12} = \frac{V_2}{K_{21}} + (r_{cc12} + jx_{cc12})K_{21}I_2 \cos \varphi_2 -$$

$$j (r_{cc12} + jx_{cc12})K_{21}I_2 \sin \varphi_2 + (r_1 + jl_1w)K_{31}I_3 \cos \varphi_3 - j(r_1 + jl_1w)K_{31}I_3 \sin \varphi_3 -$$

$$V_1 \cos \theta_{12} = \frac{V_2}{K_{21}} + r_{cc12}K_{21}I_2 \cos \varphi_2 + x_{cc12}K_{21}I_2 \sin \varphi_2 + r_1K_{31}I_3 \cos \varphi_3 + l_1wK_{31}I_3 \sin \varphi_3$$

$$V_1 \sin \theta_{12} = x_{cc12}K_{21}I_2 \cos \varphi_2 - r_{cc12}K_{21}I_2 \sin \varphi_2 + l_1wK_{31}I_3 \cos \varphi_3 - r_1K_{31}I_3 \sin \varphi_3$$

$$\cos \theta_{12} = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{12}}$$

Développement limité à l'ordre 2 de  $\sqrt{1 - \sin^2 \theta_{12}}$  en série de terme en  $\sin^2 \theta_{12}$ .

$$\cos \theta_{12} = \sqrt{1 - \theta_{12}^2} \approx 1 - \frac{1}{2} \sin^2 \theta_{12}$$

$$V_1 \left( 1 - \frac{1}{2} \sin^2 \theta_{12} \right) = \frac{V_2}{K_{21}} + r_{cc12} K_{21} I_2 \cos \varphi_2 + x_{cc12} K_{21} I_2 \sin \varphi_2 + r_1 K_{31} I_3 \cos \varphi_3 + l_1 w K_{31} I_3 \sin \varphi_3$$

$$\frac{1}{2} V_1 \sin^2 \theta_{12} = \frac{1}{2} V_1 \left( x_{cc12} K_{21} I_2 \cos \varphi_2 - r_{cc12} K_{21} I_2 \sin \varphi_2 + l_1 w K_{31} I_3 \cos \varphi_3 - r_1 K_{31} I_3 \sin \varphi_3 \right)^2$$

$$(1) + (2) \Leftrightarrow$$

$$V_1 = \frac{V_2}{K_{21}} + r_{cc12} K_{21} I_2 \cos \varphi_2 + x_{cc12} K_{21} I_2 \sin \varphi_2 + r_1 K_{21} I_3 \cos \varphi_3 + l_3 w K_{21} I_3 \sin \varphi_3 +$$

$$\frac{1}{2V_1} \left( x_{cc12} K_{21} I_2 \cos \varphi_2 - r_{cc12} K_{21} I_2 \sin \varphi_2 + l_1 w K_{31} I_3 \cos \varphi_3 - r_1 K_{31} I_3 \sin \varphi_3 \right)^2$$

$$\Delta V_2 \% = \frac{\left( V_1 - \frac{V_2}{K_{21}} \right)}{V_1} 100 =$$

$$\frac{r_{cc12} K_{21} I_2 100}{V_1} \cos \varphi_2 + \frac{x_{cc12} K_{21} I_2 100}{V_1} \sin \varphi_2 + \frac{r_1 K_{21} I_3 100}{V_1} \cos \varphi_3 + \frac{l_1 w K_{31} I_3 100}{V_1} \sin \varphi_3 +$$

$$\frac{100}{2V_1^2} \left( x_{cc12} K_{21} I_2 \cos \varphi_2 - r_{cc12} K_{21} I_2 \sin \varphi_2 + l_1 w K_{31} I_3 \cos \varphi_3 - r_1 K_{31} I_3 \sin \varphi_3 \right)^2$$

$$= \frac{r_{cc12} K_{21} I_2 100}{V_1} \cos \varphi_2 + \frac{x_{cc12} K_{21} I_2 100}{V_1} \sin \varphi_2 + \frac{r_1 K_{21} I_3 100}{V_1} \cos \varphi_3 + \frac{l_1 w K_{31} I_3 100}{V_1} \sin \varphi_3 +$$

$$\frac{100^2}{200V_1^2} \left( x_{cc12} K_{21} I_2 \cos \varphi_2 - r_{cc12} K_{21} I_2 \sin \varphi_2 + l_1 w K_{31} I_3 \cos \varphi_3 - r_1 K_{31} I_3 \sin \varphi_3 \right)^2$$

$$= \frac{r_{cc12} K_{21} I_2 100}{V_1} \cos \varphi_2 + \frac{x_{cc12} K_{21} I_2 100}{V_1} \sin \varphi_2 + \frac{r_1 K_{21} I_3 100}{V_1} \cos \varphi_3 + \frac{l_1 w K_{31} I_3 100}{V_1} \sin \varphi_3 +$$

$$\frac{1}{200} \left( \frac{x_{cc12} K_{21} I_2 100}{V_1} \cos \varphi_2 - \frac{r_{cc12} K_{21} I_2 100}{V_1} \sin \varphi_2 + \frac{l_1 w K_{31} I_3 100}{V_1} \cos \varphi_3 - \frac{r_1 K_{31} I_3 100}{V_1} \sin \varphi_3 \right)^2$$

$$\Delta V_2 \% = \Delta v_2 = v_{cca12} \cos \varphi_2 + v_{ccr12} \sin \varphi_2 + v_{cca1} \cos \varphi_3 + v_{ccr1} \sin \varphi_3 +$$

$$\frac{1}{200} \left( v_{ccr12} \cos \varphi_2 - v_{cca12} \sin \varphi_2 + v_{ccr1} \cos \varphi_3 - v_{cca1} \sin \varphi_3 \right)^2$$

❖ **Coté tertiaire :**

$$\Delta V_3 \% = \frac{(V_{30} - V_3)}{V_{30}} 100$$

$$\Delta V_3 \% = \frac{(K_{31}V_1 - V_3)}{k_{31}V_1} 100 = \frac{(V_1 - \frac{V_3}{K_{31}})}{V_1} 100$$

La relation de  $\Delta V_3 \% = \Delta v_3$  s'obtient à partir de celle de  $\Delta v_2$  en permutant les indices 2 et 3.

Soit :

$$\Delta V_3 \% = \Delta v_3 = v_{cca13} \cos \varphi_2 + v_{ccr13} \sin \varphi_2 + v_{cca1} \cos \varphi_3 + v_{ccr1} \sin \varphi_3 +$$

$$\frac{1}{200} (v_{ccr13} \cos \varphi_2 - v_{cca13} \sin \varphi_2 + v_{ccr1} \cos \varphi_3 - v_{cca1} \sin \varphi_3)^2$$

$$V_1 = \frac{V_2}{K_{21}} + r_{cc12} K_{21} I_2 \cos \varphi_2 + x_{cc12} K_{21} I_2 \sin \varphi_2 + r_1 K_{21} I_3 \cos \varphi_3 + l_3 w K_{21} I_3 \sin \varphi_3 +$$

$$\frac{1}{2V} (x_{cc12} K_{21} I_2 \cos \varphi_2 - r_{cc12} K_{21} I_2 \sin \varphi_2 + l_1 w K_{31} I_3 \cos \varphi_3 - r_1 K_{31} I_3 \sin \varphi_3)^2$$

#### I-5-4-Rendement

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

$$\eta = \frac{P_2 + P_3}{P_1} \quad \text{Avec : } P_2 = V_2 I_2 \cos \varphi_2$$

$$P_3 = V_3 I_3 \cos \varphi_3$$

On va utiliser le principe de répartition des puissances :

$$P_1 = P_2 + P_3 + \sum \text{Pertes}$$

$$\sum \text{Pertes} = P_{fer} + r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2 + r_3 I_3^2$$

Soit :

$$\eta = \frac{P_2 + P_3}{P_2 + P_3 + P_{fer} + r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2 + r_3 I_3^2}$$

$$\Rightarrow \eta = \frac{P_2 + P_3 + (P_{fer} + r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2 + r_3 I_3^2) - (P_{fer} + r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2 + r_3 I_3^2)}{P_2 + P_3 + P_{fer} + r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2 + r_3 I_3^2}$$

$$\Rightarrow \eta = 1 - \frac{P_{fer} + r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2 + r_3 I_3^2}{P_2 + P_3 + P_{fer} + r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2 + r_3 I_3^2}$$

On va introduire les coefficients de charge :  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$

$$\alpha_1 = \frac{I_1}{I_{1n}} \approx \frac{V_1 I_1}{V_1 I_{1n}} = \frac{S_1}{S_{1n}}$$

$$\alpha_2 = \frac{I_2}{I_{2n}} \approx \frac{V_2 I_2}{V_{20} I_{2n}} = \frac{S_2}{S_{2n}}, (V_2 \approx V_{20})$$

$$\alpha_3 = \frac{I_3}{I_{3n}} \approx \frac{V_3 I_3}{V_{30} I_{3n}} = \frac{S_3}{S_{3n}}, (V_3 \approx V_{30})$$

On a :  $P_2 = V_2 I_2 \cos \varphi_2$

$$P_2 = V_2 \frac{I_{2n}}{I_{2n}} I_2 \cos \varphi_2 \approx V_{20} I_{2n} \frac{I_2}{I_{2n}} \cos \varphi_2$$

$$P_2 = \alpha_2 \cdot S_{2n} \cdot \cos \varphi_2$$

On a aussi :  $P_3 = V_3 I_3 \cos \varphi_3$

$$P_3 = V_3 \frac{I_{3n}}{I_{3n}} I_3 \cos \varphi_3 \approx V_{30} I_{3n} \frac{I_3}{I_{3n}} \cos \varphi_3$$

$$P_3 = \alpha_3 \cdot S_{3n} \cdot \cos \varphi_3$$

$$r_1 I_1^2 = r_1 I_{1n}^2 \cdot \frac{I_1^2}{I_{1n}^2} = \alpha_1^2 r_1 I_{1n}^2$$

$$r_2 I_2^2 = r_2 I_{2n}^2 \cdot \frac{I_2^2}{I_{2n}^2} = \alpha_2^2 r_2 I_{2n}^2$$

$$r_3 I_3^2 = r_3 I_{3n}^2 \cdot \frac{I_3^2}{I_{3n}^2} = \alpha_3^2 r_3 I_{3n}^2$$

$$\Rightarrow \eta = 1 - \frac{P_{fer} + \alpha_1^2 r_1 I_{1n}^2 + \alpha_2^2 r_2 I_{2n}^2 + \alpha_3^2 r_3 I_{3n}^2}{\alpha_2 S_{2n} \cos \varphi_2 + \alpha_3 S_{3n} \cos \varphi_3 + P_{fer} + \alpha_1^2 r_1 I_{1n}^2 + \alpha_2^2 r_2 I_{2n}^2 + \alpha_3^2 r_3 I_{3n}^2}$$

## I-6-Etude du fonctionnement par les inductances mutuelles [1]

### I-6-1-Répartition des flux :

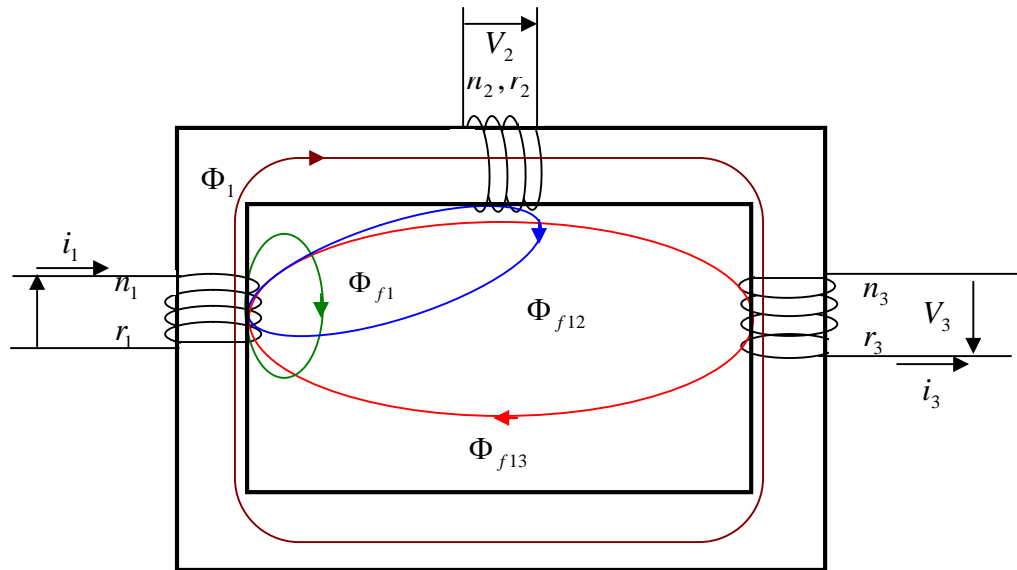


Figure I-11 : Répartition des flux

La *fmm* primaire  $\xi_1 = n_1 i_1$  crée  $\Phi_{t1} = \Phi_1 + \Phi_{f1} + \Phi_{f12} + \Phi_{f13}$

La *fmm* secondaire  $\xi_2 = n_2 i_2$  crée  $\Phi_{t2} = \Phi_2 + \Phi_{f2} + \Phi_{f21} + \Phi_{f23}$

La *fmm* tertiaire  $\xi_3 = n_3 i_3$  crée  $\Phi_{t3} = \Phi_3 + \Phi_{f3} + \Phi_{f31} + \Phi_{f32}$

Dans un transformateur à 3 enroulements, il existe des flux de dispersion dont chacun se ferme autour d'un des enroulements, et ainsi que des flux de dispersion embrassant une paire d'enroulements (Fig. I-11).

#### 1-6-1-1-Flux réels dans l'enroulement primaire $\Phi_{r1}$

$$\Phi_{r1} = \Phi_{t1} - \Phi_2 - \Phi_{f21} - \Phi_3 - \Phi_{f31}$$

$$\Phi_{r1} = \Phi_1 + \Phi_{f1} + \Phi_{f12} + \Phi_{f13} - \Phi_2 - \Phi_{f21} - \Phi_3 - \Phi_{f31}$$

#### 1-6-1-2-Flux réels dans l'enroulement secondaire $\Phi_{r2}$ :

$$\Phi_{r2} = -\Phi_{t2} + \Phi_1 + \Phi_{f12} - \Phi_3 - \Phi_{f32}$$

$$\Phi_{r2} = -\Phi_2 - \Phi_{f2} + \Phi_{f21} - \Phi_{f23} + \Phi_1 + \Phi_{f12} - \Phi_3 - \Phi_{f32}$$

### 1-6-1-3-Flux réels dans l'enroulement Tertiaire $\Phi_{r3}$

$$\Phi_{r3} = -\Phi_{t3} + \Phi_1 + \Phi_{f13} - \Phi_2 - \Phi_{f23}$$

$$\Phi_{r3} = -\Phi_3 - \Phi_{f3} + \Phi_{f31} - \Phi_{f32} + \Phi_1 + \Phi_{f13} - \Phi_2 - \Phi_{f23}$$

### 1-6-2-Divers inductances

Dans cette méthode, il est associé à des flux canalisés par le circuit magnétique diverses inductances. Cela ne serait exact que si le circuit magnétique est linéaire (perméabilité constante) et dépourvu d'hystérésis.

#### 1-6-2-1-Inductances principales

Les flux  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  et  $\Phi_3$  empruntent les mêmes trajets dans le circuit magnétique, les réluctances offertes à leur passage sont égales.

- Enroulement Primaire  $L_{p1}$  :

$$L_{p1} = \frac{n_1 \Phi_1}{i_1}$$

$$n_1 i_1 = \mathfrak{R} \Phi_1$$

$$\Rightarrow \frac{\Phi_1}{i_1} = \frac{n_1}{\mathfrak{R}}$$

Soit :

$$L_{p1} = \frac{n_1^2}{\mathfrak{R}}$$

$\mathfrak{R}$  : est la réluctance offerte au passage des flux  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  et  $\Phi_3$ .

- Enroulement Secondaire  $L_{p2}$  :

$$L_{p2} = \frac{n_2 \Phi_2}{i_2}$$

$$n_2 i_2 = \mathfrak{R} \Phi_2 \quad \Rightarrow \frac{\Phi_2}{i_2} = \frac{n_2}{\mathfrak{R}}$$

Soit :

$$L_{p2} = \frac{n_2^2}{\mathfrak{R}}$$

- Enroulement Tertiaire  $L_{p3}$  :

$$L_{p3} = \frac{n_3 \Phi_3}{i_3}$$

$$n_3 i_3 = \mathfrak{R} \Phi_3 \quad \Rightarrow \frac{\Phi_3}{i_3} = \frac{n_3}{\mathfrak{R}}$$

Soit :

$$L_{p3} = \frac{n_3^2}{\mathfrak{R}}$$

**-Rapport de transformation théorique :**

Primaire Secondaire :  $K_{21} = \frac{n_2}{n_1}$

❖ Primaire Tertiaire :  $K_{31} = \frac{n_3}{n_1}$

$$L_{p1} = \frac{n_1^2}{\mathfrak{R}} = \frac{n_2^2}{\mathfrak{R}} \frac{n_1^2}{n_2^2} \quad \Rightarrow L_{p1} = \frac{L_{p2}}{K_{21}^2}$$

$$= \frac{n_3^2}{\mathfrak{R}} \cdot \frac{n_1^2}{n_3^2} \quad \Rightarrow L_{p1} = \frac{L_{p3}}{K_{31}^2}$$

### I-6-2-2-Inductances mutuelles

❖ **Entre enroulement primaire et secondaire  $M_{12}, M_{21}$  :**

•  $M_{12} = \frac{n_2 \cdot \Phi_1}{i_1}$

$$n_1 i_1 = \mathfrak{R} \Phi_1 \Rightarrow \frac{\Phi_1}{i_1} = \frac{n_1}{\mathfrak{R}} \quad \Rightarrow M_{12} = \frac{n_1 n_2}{\mathfrak{R}}$$

•  $M_{21} = \frac{n_1 \cdot \Phi_2}{i_2}$

$$n_2 i_2 = \mathfrak{R} \Phi_2 \Rightarrow \frac{\Phi_2}{i_2} = \frac{n_2}{\mathfrak{R}} \quad \Rightarrow M_{21} = \frac{n_1 n_2}{\mathfrak{R}} = M_{12}$$

❖ **Entre enroulement primaire et tertiaire  $M_{13}, M_{31}$  :**

•  $M_{13} = \frac{n_3 \cdot \Phi_1}{i_1} \quad \Rightarrow M_{13} = \frac{n_1 n_3}{\mathfrak{R}}$

•  $M_{31} = \frac{n_1 \cdot \Phi_3}{i_3} \quad \Rightarrow M_{31} = \frac{n_3 n_1}{\mathfrak{R}} = M_{13}$

❖ **Entre enroulement secondaire et tertiaire  $M_{23}, M_{32}$  :**

$$\bullet \quad M_{23} = \frac{n_2 \cdot \Phi_3}{i_3} \quad \Rightarrow \quad M_{23} = \frac{n_2 n_3}{\mathfrak{R}}$$

$$\bullet \quad M_{32} = \frac{n_3 \cdot \Phi_2}{i_2} \quad \Rightarrow \quad M_{32} = \frac{n_2 n_3}{\mathfrak{R}} = M_{23}$$

### I-6-2-3-Inductances de fuites

#### a)-Fuites partielles :

##### ❖ Bobine primaire $l_1$ :

$$l_1 = \frac{n_1 \cdot \Phi_{f1}}{i_1}$$

$$n_1 i_1 = \mathfrak{R}_{f1} \Phi_{f1} \quad \Rightarrow \quad \frac{\Phi_{f1}}{i_1} = \frac{n_1}{\mathfrak{R}_{f1}} \quad \Rightarrow \quad l_1 = \frac{n_1^2}{\mathfrak{R}_{f1}}$$

$$l_1 = \frac{n_1 \cdot \Phi_{f1}}{i_1} = \frac{n_1^2}{\mathfrak{R}_{f1}}$$

$$l_{12} = \frac{n_1 \cdot \Phi_{f12}}{i_1} = \frac{n_1^2}{\mathfrak{R}_{f12}}$$

$$l_{13} = \frac{n_1 \cdot \Phi_{f13}}{i_1} = \frac{n_1^2}{\mathfrak{R}_{f13}}$$

##### ❖ Bobine secondaire $l_2$ :

$$l_2 = \frac{n_2 \cdot \Phi_{f2}}{i_2} = \frac{n_2^2}{\mathfrak{R}_{f2}}$$

$$l_{21} = \frac{n_2 \cdot \Phi_{f21}}{i_2} = \frac{n_2^2}{\mathfrak{R}_{f21}}$$

$$l_{23} = \frac{n_2 \cdot \Phi_{f23}}{i_2} = \frac{n_2^2}{\mathfrak{R}_{f23}}$$

##### ❖ Bobine tertiaire $l_3$ :

$$l_3 = \frac{n_3 \cdot \Phi_{f3}}{i_3} = \frac{n_3^2}{\mathfrak{R}_{f3}}$$

$$l_{31} = \frac{n_3 \cdot \Phi_{f31}}{i_3} = \frac{n_3^2}{\mathfrak{R}_{f31}}$$

$$l_{32} = \frac{n_3 \cdot \Phi_{f32}}{i_3} = \frac{n_3^2}{\mathfrak{R}_{f32}}$$

Les flux  $\Phi_{f12}$  et  $\Phi_{f21}$  empruntent pratiquement les mêmes trajets dans l'air, les réductances offertes à leur passage sont donc égales. Il en est également de même des flux  $\Phi_{f13}$  et  $\Phi_{f31}$  d'une part, et  $\Phi_{f23}$  et  $\Phi_{f32}$  d'autre part. Il résulte que :

$$l_{21} = K_{21}^2 J_{12} \quad \text{Avec : } K_{21} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$l_{31} = K_{31}^2 J_{13} \quad \text{Avec : } K_{31} = \frac{n_3}{n_1}$$

$$l_{32} = K_{32}^2 J_{23} \quad \text{Avec : } K_{32} = \frac{n_3}{n_2}$$

## b)-Fuites entre paires d'enroulement

### ❖ Primaire-Secondaire

$$\left. \begin{aligned} m_{12} &= \frac{n_2 \cdot \Phi_{f12}}{i_1} \\ m_{21} &= \frac{n_1 \cdot \Phi_{f21}}{i_2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow m_{21} = m_{12}$$

### ❖ Primaire-Tertiaire

$$\left. \begin{aligned} m_{13} &= \frac{n_3 \cdot \Phi_{f13}}{i_1} \\ m_{31} &= \frac{n_1 \cdot \Phi_{f31}}{i_3} \end{aligned} \right\} \Rightarrow M_{13} = M_{31}$$

### ❖ Secondaire-Tertiaire

$$\left. \begin{aligned} m_{23} &= \frac{n_3 \cdot \Phi_{f23}}{i_2} \\ m_{32} &= \frac{n_2 \cdot \Phi_{f32}}{i_3} \end{aligned} \right\} \Rightarrow M_{23} = M_{32}$$

## I-6-3-Equations des tensions

### I-6-3-1-Enroulement primaire

$$V_1 = r_1 i_1 + n_1 \frac{d\Phi_{r1}}{dt}$$

$$\begin{aligned}
&= r_1 i_1 + n_1 \frac{d\Phi_1}{dt} + n_1 \frac{d\Phi_{f1}}{dt} + n_1 \frac{d\Phi_{f12}}{dt} + n_1 \frac{d\Phi_{f13}}{dt} \\
&\quad - n_1 \frac{d\Phi_2}{dt} - n_1 \frac{d\Phi_{f21}}{dt} - n_1 \frac{d\Phi_{f3}}{dt} - n_1 \frac{d\Phi_{f31}}{dt} \\
&= r_1 i_1 + L_{p1} \frac{di_1}{dt} + l_1 \frac{di_1}{dt} + l_{12} \frac{di_1}{dt} + l_{13} \frac{di_1}{dt} \\
&\quad - M_{21} \frac{di_2}{dt} - m_{21} \frac{di_2}{dt} - M_{31} \frac{di_3}{dt} - m_{31} \frac{di_3}{dt}
\end{aligned}$$

Soit en complexe :

$$\bar{V}_1 = r_1 \bar{I}_1 + j(L_{p1} + l_1 + l_{12} + l_{13}) \omega \bar{I}_1 - j(M_{21} + m_{21}) \omega \bar{I}_2 - j(M_{31} + m_{31}) \omega \bar{I}_3$$

Et finalement :

$$\bar{V}_1 = [r_1 + j(L_{p1} + l_1 + l_{12} + l_{13}) \omega] \bar{I}_1 - j(M_{21} + m_{21}) \omega \bar{I}_2 - j(M_{31} + m_{31}) \omega \bar{I}_3 \quad (1)$$

### I-6-3-2- Enroulement secondaire

$$\begin{aligned}
-V_2 &= r_2 i_2 - n_2 \frac{d\Phi_{r2}}{dt} \\
&= r_2 i_2 + n_2 \frac{d\Phi_2}{dt} + n_2 \frac{d\Phi_{f2}}{dt} + n_2 \frac{d\Phi_{f21}}{dt} + n_2 \frac{d\Phi_{f23}}{dt} \\
&\quad - n_2 \frac{d\Phi_1}{dt} - n_2 \frac{d\Phi_{f12}}{dt} + n_2 \frac{d\Phi_3}{dt} + n_2 \frac{d\Phi_{f32}}{dt} \\
&= r_2 i_2 + L_{p2} \frac{di_2}{dt} + l_2 \frac{di_2}{dt} + l_{21} \frac{di_2}{dt} + l_{23} \frac{di_2}{dt} \\
&\quad - M_{12} \frac{di_1}{dt} - m_{12} \frac{di_1}{dt} + M_{32} \frac{di_3}{dt} + m_{32} \frac{di_3}{dt}
\end{aligned}$$

Soit en complexe :

$$-\bar{V}_2 = r_2 \bar{I}_2 + j(L_{p2} + l_2 + l_{21} + l_{23}) \omega \bar{I}_2 - j(M_{12} + m_{12}) \omega \bar{I}_1 - j(M_{32} + m_{32}) \omega \bar{I}_3$$

Et finalement :

$$-\bar{V}_2 = -j(M_{12} + m_{12}) \omega \bar{I}_1 + [r_2 + j(L_{p2} + l_2 + l_{21} + l_{23}) \omega] \bar{I}_2 + j(M_{32} + m_{32}) \omega \bar{I}_3 \quad (2)$$

### I-6-3-3- Enroulement tertiaire

$$\begin{aligned}
 -V_3 &= r_3 i_3 - n_3 \frac{d\Phi_{r3}}{dt} \\
 &= r_3 i_3 + n_3 \frac{d\Phi_3}{dt} + n_3 \frac{d\Phi_{f3}}{dt} + n_3 \frac{d\Phi_{f31}}{dt} + n_3 \frac{d\Phi_{f32}}{dt} \\
 &\quad - n_3 \frac{d\Phi_1}{dt} - n_3 \frac{d\Phi_{f13}}{dt} + n_3 \frac{d\Phi_2}{dt} + n_3 \frac{d\Phi_{f23}}{dt} \\
 &= r_3 i_3 + L_{p3} \frac{di_3}{dt} + l_3 \frac{di_3}{dt} + l_{31} \frac{di_3}{dt} + l_{32} \frac{di_3}{dt} \\
 &\quad - M_{13} \frac{di_1}{dt} - m_{13} \frac{di_1}{dt} + M_{23} \frac{di_2}{dt} + m_{23} \frac{di_2}{dt}
 \end{aligned}$$

Soit en complexe :

$$-\bar{V}_3 = r_3 \bar{I}_3 + j(L_{p3} + l_3 + l_{31} + l_{32}) w \bar{I}_3 - j(M_{13} + m_{13}) w \bar{I}_1 - j(M_{23} + m_{23}) w \bar{I}_2$$

Et finalement :

$$-\bar{V}_3 = -j(M_{13} + m_{13}) w \bar{I}_1 + [r_3 + j(L_{p3} + l_3 + l_{31} + l_{32}) w] \bar{I}_3 + j(M_{23} + m_{23}) w \bar{I}_2 \quad (3)$$

### I-6-3-4-Rapport de transformation à vide

Alimentation par le primaire, secondaire et le tertiaire en circuit ouvert.

Dans ce cas  $I_1 = I_{10}; I_2 = 0; I_3 = 0; V_2 = V_{20}; V_3 = V_{30}$

Les équations (1), (2) et (3) deviennent respectivement :

$$V_1 = [r_1 + j(L_{p1} + l_1 + l_{12} + l_{13}) w] \bar{I}_{10}$$

$$\bar{V}_{20} = j(M_{12} + m_{12}) w \bar{I}_{10}$$

$$\bar{V}_{30} = j(M_{13} + m_{13}) w \bar{I}_{10}$$

• **Rapport de transformation primaire-secondaire :**

$$K_{21} = \frac{\bar{V}_{20}}{\bar{V}_1} = \frac{j(M_{12} + m_{12}) w}{[r_1 + j(L_{p1} + l_1 + l_{12} + l_{13}) w]}$$

• **Rapport de transformation primaire-tertiaire :**

$$K_{31} = \frac{\bar{V}_{30}}{\bar{V}_1} = \frac{j(M_{13} + m_{13}) w}{[r_1 + j(L_{p1} + l_1 + l_{12} + l_{13}) w]}$$

#### I-6-4-Equations des $fmm$ :

La résultante des  $fmm$  en charge est égale à la  $fmm$  à vide. On a selon la convention adoptée.

$$n_1 \bar{I}_1 = n_1 \bar{I}_{10} + n_2 \bar{I}_2 + n_3 \bar{I}_3$$

En divisant membre à membre par  $n_1$ , on fait intervenir les rapports de transformation  $K_{21}$  et  $K_{31}$  définis précédemment.

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{10} + K_{21} \bar{I}_2 + K_{31} \bar{I}_3$$

On rappelle que :

$$K_{21} = \frac{n_2}{n_1}, \text{ le rapport de transformation primaire-secondaire.}$$

$$K_{31} = \frac{n_3}{n_1}, \text{ le rapport de transformation primaire-tertiaire.}$$

#### I-6-5-Secondaire et tertiaire ramenés au primaire

Posons :

$$\bar{I}_{r1} = K_{21} \bar{I}_2 : \text{Le courant secondaire ramené au primaire ;}$$

$$\bar{I}_{r3} = K_{31} \bar{I}_3 : \text{Le courant tertiaire ramené au primaire ;}$$

$$\bar{V}_{r2} = \frac{\bar{V}_2}{K_{21}} : \text{La tension secondaire ramené au primaire ;}$$

$$\bar{V}_{r3} = \frac{\bar{V}_3}{K_{31}} : \text{La tension tertiaire ramenée au secondaire;}$$

Soient les trois équations des tensions (1), (2) et (3) obtenues précédemment, et dans lesquelles  $\bar{I}_1$  sera remplacée par  $(K_{21} \bar{I}_2 + K_{31} \bar{I}_3) = \bar{I}_{r2} + \bar{I}_{r3}$ , ( $\bar{I}_{10}$  négligé)

Divisons ensuite l'équation (2) par  $K_{21}$ , l'équation (3) par  $K_{31}$ .

$$\bar{V}_1 = [r_1 + j(L_{p1} + l_1 + l_{12} + l_{13})w] \bar{I}_{r2} - j(M_{21} + m_{21})w \bar{I}_2$$

$$+ [r_1 + j(L_{p1} + l_1 + l_{12} + l_{13})w] \bar{I}_{r3} - j(M_{31} + m_{31})w \bar{I}_3 \quad (4)$$

$$-\bar{V}_{r2} = -j\left(\frac{1}{K_{21}}\right)(M_{12} + m_{12})w \bar{I}_{r2} + \left(\frac{1}{K_{21}^2}\right)[r_2 + j(L_{p2} + l_2 + l_{21} + l_{23})w] \bar{I}_{r2}$$

$$-j\left(\frac{1}{K_{21}}\right)(M_{12} + m_{12})w \bar{I}_{r3} + j\left(\frac{1}{K_{21}K_{31}}\right)(M_{32} + m_{32})w \bar{I}_{r3} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
-\bar{V}_{r3} = & -j\left(\frac{1}{K_{31}}\right)(M_{13} + m_{13})w\bar{I}_{r3} + j\left(\frac{1}{K_{21}K_{31}}\right)(M_{23} + m_{23})w\bar{I}_{r2} \\
& + \left(\frac{1}{K_{31}}\right)[r_3 + j(L_{P3} + l_3 + l_{31} + l_{32})w]\bar{I}_{r3} - j\left(\frac{1}{K_{31}}\right)(M_{13} + m_{13})w\bar{I}_{r3} \quad (6)
\end{aligned}$$

Additionnons membre à membre les équations (4) et (5) :

$$\begin{aligned}
\bar{V}_1 - \bar{V}_{r2} = & [r_1 + j(L_{P1} + l_1 + l_{12} + l_{13})w]\bar{I}_{r2} - j(M_{21} + m_{21})w\bar{I}_2 \\
& + [r_1 + j(L_{P1} + l_1 + l_{12} + l_{13})w]\bar{I}_{r3} - j(M_{31} + m_{31})w\bar{I}_3 \\
& - j\left(\frac{1}{K_{21}}\right)(M_{12} + m_{12})w\bar{I}_{r2} + \left(\frac{1}{K_{21}^2}\right)[r_2 + j(L_{P2} + l_2 + l_{21} + l_{23})w]\bar{I}_{r2} \\
& - j\left(\frac{1}{K_{21}}\right)(M_{12} + m_{12})w\bar{I}_{r3} + j\left(\frac{1}{K_{21}K_{31}}\right)(M_{32} + m_{32})w\bar{I}_{r3} \\
\bar{V}_1 - \bar{V}_{r2} = & (r_1 + \frac{r_2}{K_{21}^2})\bar{I}_{r2} \\
& + j[(L_{P1} + l_1 + l_{12} + l_{13}) + (L_{P2} + l_2 + l_{21} + l_{23}) / K_{21}^2 - 2(M_{21} + m_{21}) / K_{21}]w\bar{I}_{r2} \\
& + r\bar{I}_{r3} \\
& + j(L_{P1} + l_1 + l_{12} + l_{13} + (M_{32} + m_{32}) / K_{21}K_{31} - (M_{12} + m_{12}) / K_{21} - (M_{31} + m_{31}) / K_{31})w\bar{I}_{r3}
\end{aligned}$$

Posons :

$$A = L_{P1} + l_1 + l_{12} + l_{13} + (L_{P2} + l_2 + l_{21} + l_{23}) / K_{21}^2 - 2(M_{21} + m_{21}) / K_{21}$$

$$B = L_{P1} + l_1 + l_{12} + l_{13} + (M_{32} + m_{32}) / K_{21}K_{31} - (M_{12} + m_{12}) / K_{21} - (M_{31} + m_{31}) / K_{31}$$

Il est facile de montrer que

$$L_{P1} = L_{P2} / K_{21}^2 = M_{21} / K_{21}$$

$$l_{12} = l_{21} / K_{21}^2 = m_{21} / K_{21}$$

A et B alors se simplifient

$$A = l_1 + l_{23} / K_{21}^2 + l_2 / K_{21}^2 + l_{13}$$

$$B = l_1 + l_{23} / K_{21}^2$$

Il vient finalement

$$\begin{aligned}
\bar{V}_1 = & \bar{V}_{r2} + (r_1 + r_2 / K_{21}^2)\bar{I}_{r2} + j(l_1 + l_{23} / K_{21}^2 + l_2 / K_{21}^2 + l_{13})w\bar{I}_{r2} + r_1\bar{I}_{r3} + j(l_1 + l_{23} / K_{21}^2)w\bar{I}_{r3} \\
(7)
\end{aligned}$$

Additionnons membre à membre les équations (4) et (6).

$$\begin{aligned}
\overline{V}_1 - \overline{V}_{r3} &= [r_1 + j(L_{p1} + l_1 + l_{12} + l_{13})w] \overline{I}_{r2} - j(1/K_{21})(M_{21} + m_{21})w \overline{I}_{r2} - j(1/K_{31})(M_{13} + m_{13})w \overline{I}_{r2} \\
&+ j(1/K_{21}K_{31})(M_{23} + m_{23})w \overline{I}_{r2} + [r_1 + j(L_{p1} + l_1 + l_{12} + l_{13})w] \overline{I}_{r3} - j(1/K_{31})(M_{31} + m_{31})w \overline{I}_{r3} \\
&+ (1/K_{31}^2)[r_3 + j(L_{p3} + l_3 + l_{31} + l_{32})w] \overline{I}_{r3} - j(1/K_{31})(M_{13} + m_{13})w \overline{I}_{r3} \\
\overline{V}_1 - \overline{V}_{r3} &= r_1 \overline{I}_{r2} + \\
&+ j[L_{p1} + l_1 + l_{12} + l_{13} + (M_{23} + m_{23})/K_{21}K_{31} - (M_{21} + m_{21})/K_{21} - (M_{13} + m_{13})/K_{31}]w \overline{I}_{r2} + (r_1 + r_3/K_{31}^2) \overline{I}_{r3} \\
&+ j[L_{p1} + l_1 + l_{12} + l_{13} + (L_{p3} + l_3 + l_{31} + l_{32})/K_{31}^2 - 2(M_{13} + m_{13})/K_{31}]w \overline{I}_{r3}
\end{aligned}$$

Posons :

$$C = L_{p1} + l_1 + l_{12} + l_{13} + (M_{23} + m_{23})/K_{21}K_{31} - (M_{21} + m_{21})/K_{21} - (M_{13} + m_{13})/K_{31}$$

$$D = L_{p1} + l_1 + l_{12} + l_{13} + (L_{p3} + l_3 + l_{31} + l_{32})/K_{31}^2 - 2(M_{13} + m_{13})/K_{31}$$

On trouve après simplification

$$C = l_1 + l_{23}/K_{21}^2$$

$$D = l_1 + l_{23}/K_{21}^2 + l_3/K_{21}^2 + l_{12}$$

On obtient finalement

$$\overline{V}_1 = \overline{V}_{r3} + r_1 \overline{I}_{r2} + j(l_1 + l_{23}/K_{21}^2)w \overline{I}_{r2} + (r_1 + r_3/K_{31}^2) \overline{I}_{r3} + j(l_1 + l_{23}/K_{31}^2 + l_{12})w \overline{I}_{r3} \quad (8)$$

✓ **Impédances en court circuit** (Un enroulement ouvert) :

Si un des enroulements est ouvert, on se retrouve en présence d'un transformateur à deux enroulements.

- Soit une alimentation par le primaire, secondaire en court circuit et tertiaire ouvert :

$$(V_1 = V_{cc12}; V_{r2} = 0; I_{r2} = I_{r2cc}; I_{r3} = 0)$$

L'équation (7) s'écrit en court circuit

$$\begin{aligned}
\overline{V}_{cc12} &= (r_1 + r_2/K_{21}^2) \overline{I}_{r2cc} + j(l_1 + l_{23}/K_{21}^2 + l_2/K_{21}^2 + l_{13})w \overline{I}_{r2cc} \\
&= [(r_1 + r_2/K_{21}^2) + j(l_1 + l_{23}/K_{21}^2 + l_2/K_{21}^2 + l_{13})w] \overline{I}_{r2cc}
\end{aligned}$$

En posant :

$$\overline{V}_{cc12} = (R_{cc12} + jX_{cc12}) \overline{I}_{r2cc} = \overline{Z}_{cc12} \overline{I}_{r2cc}$$

On déduit :

$$r_{cc12} = r_1 + r_2/k_{21}^2$$

$$x_{cc12} = (l_1 + l_{23} / K_{21}^2 + l_2 / K_{21}^2 + l_{13})w$$

En posant aussi

$$x_1 = l_1 w + l_{23} w / K_{21}^2$$

$$x_2 = l_2 w / K_{21}^2 + l_{13} w$$

On aura :

$$x_{cc12} = x_1 + x_2 \quad (9)$$

L'équation (7) prend finalement la forme suivante :

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_{r2} + (r_{cc12} + jx_{cc12})\bar{I}_{r2} + (r_1 + jx_1)\bar{I}_{r3} \quad (10)$$

- Pour un alimentation par le primaire, tertiaire en court circuit et secondaire ouvert

$$(V_1 = V_{cc13}; V_{r3} = 0; I_{r2} = 0; I_{r3} = I_{r3cc}).$$

L'équation (8) s'écrit dans ce cas en court circuit,

$$\bar{V}_{cc13} = (r_1 + r_3 / K_{31}^2)\bar{I}_{r3cc} + j(l_1 + l_{23} / K_{21}^2 + l_3 / K_{31}^2 + l_{12})w\bar{I}_{r3cc}$$

$$= [ (r_1 + r_3 / K_{31}^2) + j(l_1 + l_{23} / K_{21}^2 + l_3 / K_{31}^2 + l_{12})w ] \bar{I}_{r3cc}$$

En posant

$$\bar{V}_{cc13} = (r_{cc13} + jx_{cc13})\bar{I}_{r3cc} = \bar{Z}_{cc13}\bar{I}_{r3cc}$$

On déduit

$$r_{cc13} = r_1 + r_3 / K_{31}^2$$

$$x_{cc13} = (l_1 + l_{23} / K_{21}^2 + l_3 / K_{31}^2 + l_{12})w$$

En posant également :

$$x_3 = l_3 w / K_{31}^2 + l_{12} w$$

On obtient :

$$x_{cc13} = x_1 + x_3 \quad (11)$$

L'équation (8) prend alors la forme suivante :

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_{r3} + (r_1 + jx_1)\bar{I}_{r2} + (r_{cc13} + jx_{cc13})\bar{I}_{r3} \quad (12)$$

- Lorsqu'on alimente par le secondaire, le tertiaire en court-circuit et le primaire ouvert, on obtient également ( $V_2 = V_{cc23}; I_{r3} = I_{r3cc}; I_1 = 0$ ):

$$\bar{V}_{cc23} = (r_{cc23} + jx_{cc23})\bar{I}_{r3cc} = \bar{Z}_{r3cc}\bar{I}_{r3cc}$$

Où :

$$x_{cc23} = x_2 + x_3 \quad (13)$$

Les équations (9), (11) et (13) constituent un système d'équation en  $x_1$ ,  $x_2$  et  $x_3$ . La résolution de ce système est aisée, on obtient :

$$x_1 = (x_{cc12} + x_{cc13} - x_{cc23}) / 2$$

$$x_2 = (x_{cc12} + x_{cc23} - x_{cc13}) / 2$$

$$x_3 = (x_{cc13} + x_{cc23} - x_{cc12}) / 2$$

Les réactances de court-circuit  $x_{cc12}$ ,  $x_{cc13}$  et  $x_{cc23}$  sont fonction des paramètres géométriques des enroulements, de leurs dispositions sur les colonnes, ainsi que de la distance entre ces enroulements, leurs expressions seront données dans les chapitres suivants.

### I-6-6-Schéma équivalent

Remplaçons dans l'équation (10)  $\bar{I}_{r3}$  par  $(\bar{I}_1 - \bar{I}_{r2})$

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_{r2} + (r_{cc12} + jx_{cc12})\bar{I}_{r2} + (r_1 + jx_1)(\bar{I}_1 - \bar{I}_{r2})$$

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_{r2} + (r_1 + jx_1)\bar{I}_1 + [(r_{cc12} - r_1) + j(x_{cc12} - x_1)]\bar{I}_{r2}$$

$$\text{D'où : } \bar{V}_1 = \bar{V}_{r2} + (r_1 + jx_1) + (r_2 / K_{21}^2 + jx_2)\bar{I}_{r2} \quad (14)$$

Remplaçons dans l'équation (12)  $\bar{I}_{r2}$  par  $(\bar{I}_1 - \bar{I}_{r3})$

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_{r3} + (r_1 + jx_1)(\bar{I}_1 - \bar{I}_{r3}) + (r_{cc13} + jx_{cc13})\bar{I}_{r3}$$

$$= \bar{V}_{r3} + (r_1 + jx_1)\bar{I}_1 + [(r_{cc13} - r_1) + j(x_{cc13} - x_1)]\bar{I}_{r3}$$

Soit :

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_{r3} + (r_1 + jx_1)\bar{I}_1 + (r_3 / K_{31}^2 + jx_3)\bar{I}_{r3} \quad (15)$$

Les équations (14) et (15) se traduisent par le schéma équivalent représenté en fig.2, dans lequel on a ajouté une résistance fictive  $R_\mu$ , absorbant les pertes fer, en parallèle avec une réactance fictive  $X_\mu$ , absorbant la puissance magnétisante.

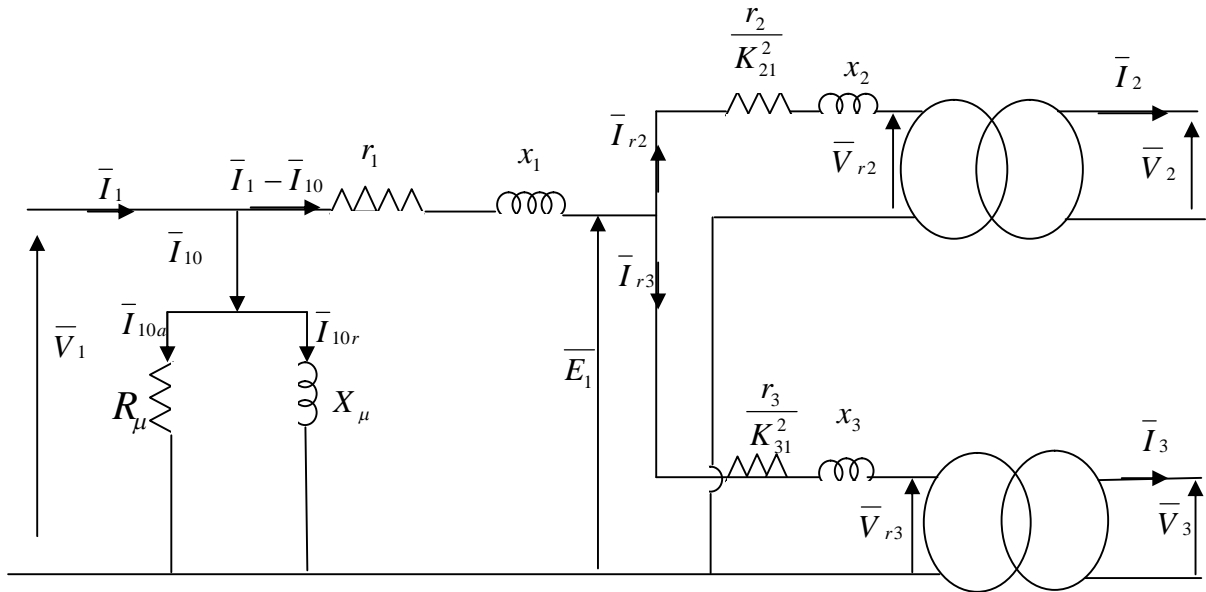


Figure I-9 : Schéma équivalent du transformateur monophasé à trois enroulements.

**I-6-7-diagramme vectoriel :**

La figure I-7 donne le diagramme vectoriel traduisant les relations (10) et (12).

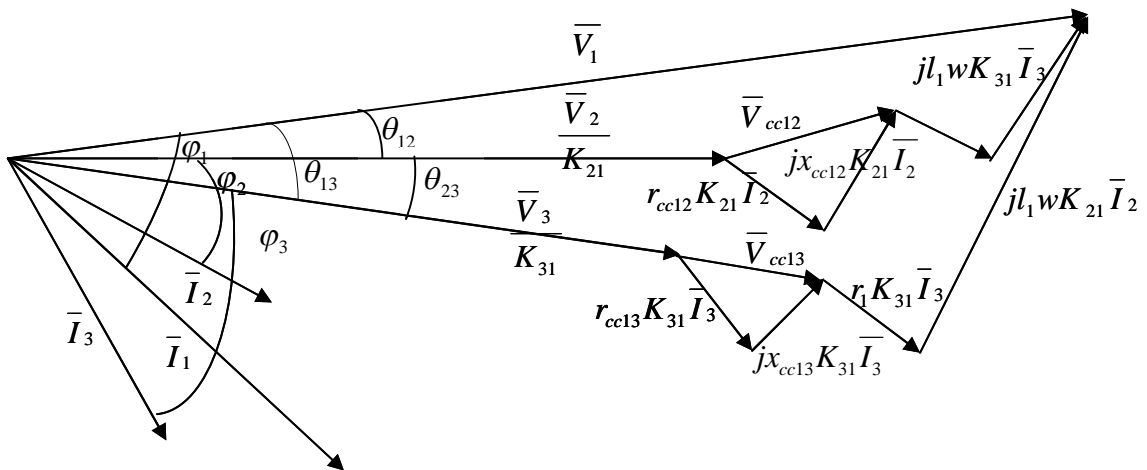


Figure I-7 : Schéma équivalent.

## I-6-8-Equations des chutes de tensions

### I-6-8-1-chute de tension secondaire

$$\Delta V_{12} = \frac{(V_{20} - V_2)}{V_{20}} 100$$

$$\Delta V_{12} = \frac{K_{21}V_1 - V_2}{K_{21}V_1} 100 = \frac{V_1 - V_{r2}}{V_1} 100$$

Considérons l'équation (10)

$$\bar{V}_{r2} = V_{r2} \quad \text{Origine des phases.}$$

$$\bar{V}_1 = V_1 e^{j\theta_{12}}$$

$$\bar{I}_{r2} = I_{r2} e^{-j\phi_2}$$

$$\bar{I}_3 = I_3 e^{-j(\phi_3 + \theta_{23})}$$

Les chutes de tension étant faibles, on a

$$\Rightarrow \bar{I}_3 \approx I_3 e^{-j\phi_3} \quad \Rightarrow \theta_{23} \ll \phi_3$$

$$V_1 e^{j\theta_{12}} = V_{r2} + r_{cc12} I_{r2} e^{-j\phi_2} + jx_{cc12} I_{r2} e^{-j\phi_2} + r_1 I_{r3} e^{-j\phi_3} + x_1 I_{r3} e^{-j\phi_3}$$

$$V_1 \cos \theta_{12} = V_{r2} + r_{cc12} I_{r2} \cos \phi_2 + x_{cc12} I_{r2} \sin \phi_2 + r_1 I_{r3} \cos \phi_3 + x_1 I_{r3} \sin \phi_3$$

$$V_1 \sin \theta_{12} = -r_{cc12} I_{r2} \sin \phi_2 + x_{cc12} I_{r2} \cos \phi_2 - r_1 I_{r3} \sin \phi_3 + x_1 I_{r3} \cos \phi_3$$

$$\cos \theta_{12} = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{12}} \approx 1 - \frac{1}{2} \sin^2 \theta_{12}$$

$$V_1 \left( 1 - \frac{1}{2} \sin^2 \theta_{12} \right) = V_{r2} + r_{cc12} I_{r2} \cos \phi_2 + x_{cc12} I_{r2} \sin \phi_2 + r_1 I_{r3} \cos \phi_3 + x_1 I_{r3} \sin \phi_3$$

$$\frac{1}{2} V_1 \sin^2 \theta_{12} = \frac{(-r_{cc12} I_{r2} \sin \phi_2 + x_{cc12} I_{r2} \cos \phi_2 - r_1 I_{r3} \sin \phi_3 + x_1 I_{r3} \cos \phi_3)^2}{2V_1}$$

$$V_1 = V_{r2} + r_{cc12} I_{r2} \cos \phi_2 + x_{cc12} I_{r2} \sin \phi_2 + r_1 I_{r3} \cos \phi_3 + x_1 I_{r3} \sin \phi_3 +$$

$$\frac{1}{2V_1} (x_{cc12} I_{r2} \cos \phi_2 - r_{cc12} I_{r2} \sin \phi_2 + x_1 I_{r3} \cos \phi_3 - r_1 I_{r3} \sin \phi_3)^2$$

Soit finalement :

$$\frac{V_1 - V_{r2}}{V_1} 100 = \frac{r_{cc12} I_{r2} 100}{V_1} \cos \phi_2 + \frac{x_{cc12} I_{r2} 100}{V_1} \sin \phi_2 + \frac{r_1 I_{r3} 100}{V_1} \cos \phi_3 + \frac{x_1 I_{r3} 100}{V_1} \sin \phi_3$$

$$+ \frac{1}{200} \left( \frac{x_{cc12} I_{r2} 100}{V_1} \cos \phi_2 - \frac{r_{cc12} I_{r2} 100}{V_1} \sin \phi_2 + \frac{x_1 I_{r3} 100}{V_1} \cos \phi_3 - \frac{r_1 I_{r3} 100}{V_1} \sin \phi_3 \right)^2$$

### I-6-8-2-Chute de tension tertiaire

$$\Delta V_{13} = \frac{(V_{30} - V_3)}{V_{30}} 100$$

$$\Delta V_{13} = \frac{K_{31}V_1 - V_3}{K_{31}V_1} 100 = \frac{V_1 - V_{r3}}{V_1} 100$$

Considérons l'équation (12)

$$\bar{V}_{r3} = V_{r3} \quad \text{Origine des phases.}$$

$$\bar{V}_1 = V_1 e^{j\theta_{13}}$$

$$\bar{I}_{r3} = I_{r3} e^{-j\phi_3}$$

$$\bar{I}_2 = I_2 e^{-j(\phi_2 + \theta_{32})}$$

Les chutes de tension étant faibles, on a

$$\Rightarrow \theta_{23} \ll \phi_3$$

$$\Rightarrow \bar{I}_3 \approx I_3 e^{-j\phi_3}$$

$$V_1 e^{j\theta_{13}} = V_{r3} + r_{cc13} I_{r3} e^{-j\phi_3} + jx_{cc13} I_{r3} e^{-j\phi_3} + r_1 I_{r2} e^{-j\phi_2} + x_1 I_{r2} e^{-j\phi_2}$$

$$V_1 \cos \theta_{13} = V_{r3} + r_{cc13} I_{r3} \cos \phi_3 + x_{cc13} I_{r3} \sin \phi_3 + r_1 I_{r2} \cos \phi_2 + x_1 I_{r2} \sin \phi_2$$

$$V_1 \sin \theta_{13} = -r_{cc13} I_{r3} \sin \phi_3 + x_{cc13} I_{r3} \cos \phi_3 - r_1 I_{r2} \sin \phi_2 + x_1 I_{r2} \cos \phi_2$$

$$\cos \theta_{13} = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{13}} \approx 1 - \frac{1}{2} \sin^2 \theta_{13}$$

$$V_1 \left( 1 - \frac{1}{2} \sin^2 \theta_{13} \right) = V_{r3} + r_{cc13} I_{r3} \cos \phi_3 + x_{cc13} I_{r3} \sin \phi_3 + r_1 I_{r2} \cos \phi_2 + x_1 I_{r2} \sin \phi_2$$

$$\frac{1}{2} V_1 \sin^2 \theta_{13} = \frac{(-r_{cc13} I_{r3} \sin \phi_3 + x_{cc13} I_{r3} \cos \phi_3 - r_1 I_{r2} \sin \phi_2 + x_1 I_{r2} \cos \phi_2)^2}{2V_1}$$

$$V_1 = V_{r3} + r_{cc13} I_{r3} \cos \phi_3 + x_{cc13} I_{r3} \sin \phi_3 + r_1 I_{r2} \cos \phi_2 + x_1 I_{r2} \sin \phi_2 +$$

$$\frac{1}{2V_1} (x_{cc13} I_{r3} \cos \phi_3 - r_{cc13} I_{r3} \sin \phi_3 + x_1 I_{r2} \cos \phi_2 - r_1 I_{r2} \sin \phi_2)^2$$

Soit finalement

$$\frac{V_1 - V_{r3}}{V_1} 100 = \frac{r_{cc13} I_{r3} 100}{V_1} \cos \phi_3 + \frac{x_{cc13} I_{r3} 100}{V_1} \sin \phi_3 + \frac{r_1 I_{r2} 100}{V_1} \cos \phi_2 + \frac{x_1 I_{r2} 100}{V_1} \sin \phi_2$$

$$+ \frac{1}{200} \left( \frac{x_{cc13} I_{r3} 100}{V_1} \cos \phi_2 - \frac{r_{cc13} I_{r3} 100}{V_1} \sin \phi_3 + \frac{x_1 I_{r2} 100}{V_1} \cos \phi_2 - \frac{r_1 I_{r2} 100}{V_1} \sin \phi_2 \right)^2$$



**Chapitre II :  
Calcul  
électromagnétique**

## Introduction

Le calcul électromagnétique d'un transformateur nécessite en premier lieu un calcul préliminaire qui consiste à déterminer, à partir du cahier des charges, les dimensions principales on se référant aux données standards de l'ELECTRO-INDUSTRIE, et aux normes internationales. On procédera ensuite à un calcul définitif de toutes les caractéristiques géométriques et électromagnétiques du transformateur.

### II-1 Calcul préliminaire des dimensions principales [4]

Ce transformateur est caractérisé par :

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

Ces dimensions sont illustrées sur la figure II-1

#### II-1-1 Puissance apparente par colonne

Elle est donnée par la formule ci-dessous :

$$S_c = \frac{S_n}{n_c} \quad [KVA] \quad (II-1)$$

$S_n$  : Puissance apparente nominale du transformateur.

$n_c$  : Nombre de colonnes ( $n_c=3$  pour un transformateur triphasé).

$$S_c = \frac{1250}{3} = 416,67 \text{ KVA}$$

$$S_c=416,6 \text{ KVA}$$

#### II-1-2-Tension dans les enroulements

##### II-1-2-a-Tension dans l'enroulement primaire $U_1$

$$U_1 = U_{nHT} \quad [KV] \quad (II-2)$$

$$U_1 = 30 \text{ KV}$$

##### II-1-2-b-Tension dans l'enroulement secondaire $U_2$

$$U_2 = U_{nBT} \quad [KV] \quad (II-3)$$

$$U_2 = 398,37 \text{ V}$$

##### II-1-2-c-Tension dans l'enroulement tertiaire $U_3$

$$U_3 = U_{nBT} \quad [KV] \quad U_3 = 690 \text{ V} \quad (\text{II-4})$$

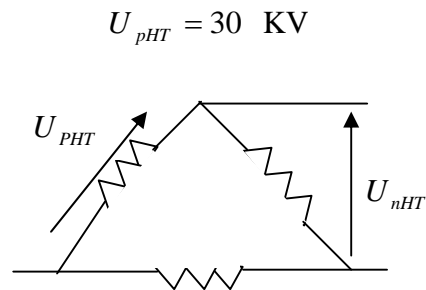
❖ **Tensions de phase  $U_p$**

Elles dépendent du mode de couplage des enroulements.

➤ **Coté primaire (HT)**

Le couplage du primaire est en triangle.

$$U_{pHT} = U_{nHT} \quad [KV] \quad (\text{II-5})$$



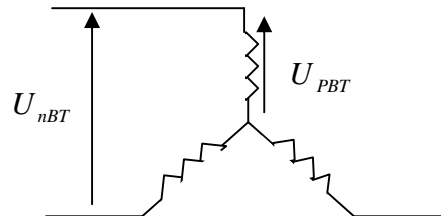
**Les enroulements sont couplés en triangle**

➤ **Coté secondaire (BT)**

Le couplage du secondaire est en étoile.

$$U_{pBT} = \frac{U_{nBT}}{\sqrt{3}} \quad [KV] \quad (\text{II-6})$$

$$U_{pBT} = \frac{690}{\sqrt{3}} = 398,37 \text{ V} \quad U_{pBT} = 398,37 \text{ V}$$



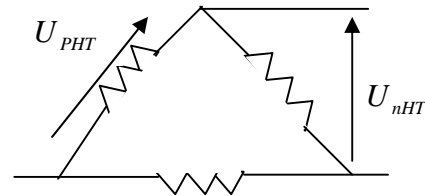
**Les enroulements sont couplés en étoile.**

➤ **Coté tertiaire (BT)**

Le couplage du tertiaire est en triangle.

$$U_{pBT} = U_{nBT} \quad [KV] \quad (II-7)$$

$$U_{pBT} = 690 \text{ V}$$



Les enroulements sont couplés en triangle.

### II-1-3-Courant dans les enroulements

Les courants dans les enroulements sont calculés suivant le mode de couplage.

#### I-1-3-a-Enroulement primaire (couplage triangle)

L'enroulement étant en triangle, donc le courant vaut :

$$I_1 = \frac{I_{nHT}}{\sqrt{3}} \quad (II-8)$$

$$I_1 = \frac{24,05}{\sqrt{3}} \quad I_1 = 13,88 \text{ A}$$

#### II-1-3-b-Enroulement secondaire (couplage étoile)

Le couplage étant en étoile, donc :

$$I_2 = I_{nBT} \quad (II-9)$$

$$I_2 = 1045,92 \text{ A}$$

#### II-1-3-c-Enroulement tertiaire (couplage triangle)

Comme le couplage est en triangle, donc :

$$I_3 = \frac{I_{nBT}}{\sqrt{3}} \quad (II-10)$$

$$I_3 = \frac{1045,92}{\sqrt{3}}$$

$$I_3 = 603,86 \text{ A}$$

### ❖ Courants de phase

#### ➤ Coté haute tension HT

$$I_{nHT} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_{nHT}} \quad [A] \quad (\text{II-11})$$

$$I_{nHT} = \frac{1250}{\sqrt{3} \cdot 30} = 24,05 \quad I_{nHT} = 24,05 \quad A$$

#### ➤ Coté basse tension BT (secondaire)

$$I_{nBT} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{nBT}} \quad [A] \quad (\text{II-12})$$

$$I_{nBT} = \frac{1250}{\sqrt{3} \cdot 690 \cdot 10^{-3}} = 1045,92 \quad I_{nBT} = 1045,92 \quad A$$

#### ➤ Coté basse tension BT (tertiaire)

$$I_{nBT} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{nBT}} \quad [A] \quad (\text{II-13})$$

$$I_{nBT} = \frac{1250}{\sqrt{3} \cdot 690 \cdot 10^{-3}} = 1045,92 \quad I_{nBT} = 1045,92 \quad A$$

### II-1-4-Tension de court-circuit $U_{cc12}$

La tension de court-circuit est déterminée entre les enroulements HT et BT.

C'est la tension appliquée au primaire lorsque le secondaire est en court-circuit et le tertiaire est ouvert ; elle est exprimée en [%] de la tension nominale. Elle est de la forme suivante :

$$U_{cc12} = \frac{U_{ccHT}}{K_B} \% \quad (\text{II-14})$$

$K_B$  : Coefficient spécifique de la puissance, il varie entre 0,25 et 0,5.

On prend  $K_B = 0,49$ .

Soit  $U_{cc12} = 12,24\%$

## II-1-5-Diamètre de la colonne D

Il est donné par la formule suivante :

$$D = 16,4 \sqrt[4]{\frac{S_c \cdot a_r \cdot K_R \cdot \beta}{f \cdot U_{ccr} \cdot B_c^2 \cdot K_u^2}} \quad [cm] \quad (II-15)$$

- $S_c$  : puissance apparente par colonne.
- $a_r$  : Epaisseur rapportée du canal de fuite.
- $K_R$  : Coefficient de Rogowski.
- $\beta$  : Coefficient de sveltesse.
- $f$  : Fréquence industrielle imposée par le réseau.
- $U_{ccr}$  : Composante réactive de la tension de court-circuit.
- $B_c$  : Induction magnétique de crête.
- $K_u$  : Facteur d'utilisation de la section du fer.

### II-1-5-a-Epaisseur rapportée du canal de fuite $a_r$

Pour les enroulements concentriques,  $a_r$  est donnée par la formule suivante :

$$a_r = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \quad [cm] \quad (II-16)$$

$a_{12}$  : Largeur du canal de fuite entre deux enroulements.

$a_1$  : Epaisseur de l'enroulement haute tension.

$a_2$  : Epaisseur de l'enroulement basse tension.

Pour un transformateur émergé dans l'huile,  $a_{12}$  est choisie dans le tableau ci-dessous :

$U_n [KV]$	3	6	10	15	20	35	110	220
$U_{CEI} [KV]$	3,6	7,2	12	17,5	24	36	123	245
$a_{12} [cm]$	0,66	1	0,8-1,2	1-1,5	1,2-1,8	2,1-2,7	6-8	13-22

**Tableau II-1**

Pour un calcul préliminaire, on prend  $a_{12} = 2,5$  cm

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

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = K \sqrt[4]{S_c} \quad [cm] \quad (II-17)$$

K : Coefficient dépendant de la puissance par colonne du transformateur et de la tension la plus élevée. La valeur de K est choisie dans le tableau suivant :

$S_c [KVA]$	<100	100-560	750-5600	7500-31500
$U_1 [KV]$	$\leq 10$	10	35	-
K	0.6-0.8	0.48-0.6	0.4-0.5	0.44-0.46

**Tableau II-2**

La valeur de K varie entre 0.48 et 0.6, pour un calcul préliminaire on prend K=0.59.

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = 0.59 \sqrt[4]{416,67}$$

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = 2,66 \text{ cm}$$

$$a_r = 2,5 + 2,66$$

$$a_r = 5,16 \text{ cm}$$

### II-1-5-b-Coefficient de sveltesse $\beta$

Le coefficient de sveltesse est donné par la formule suivante :

$$\beta = \pi \frac{D_{12}}{h_B} \quad (II-18)$$

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

$h_B$  : Hauteur de la bobine.

La valeur de  $\beta$  est fonction de la puissance par colonne, de la tension la plus grande et du type de matériau utilisé pour le bobinage.

Suivant sa valeur, le transformateur sera svelte ou trapu. Elle est choisie dans le tableau II-3

$S_c [KVA]$	3-2000		2000-3000	
$U_n [KV]$	6-10	35		100
$\beta$ (cuivre)	3,40-1,75	3-1,8	1,8-1,3	2-1,5

**Tableau II-3**

$$\beta = 2,5$$

Pour le calcul préliminaire, on choisit :

### II-1-5-c-Coefficient de Rogowski $K_R$

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

$$K_R = 1 - \frac{a_1 + a_2 + 2.a_{12}}{2.\pi.h_B} \quad (\text{II-19})$$

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

### II-1-5-d-Facteur d'utilisation de la section de fer $K_u$

Il est donné par la relation suivante :

$$K_u = K_r . K_g \quad (\text{II-20})$$

$K_r$  :Coefficient de remplissage, il dépend du type d'isolation et de l'épaisseur des tôles adoptés pour le circuit magnétique, sa valeur est choisie dans le tableau II-4.

Epaisseur des tôles	Isolation des tôles	
	Isolation avec papier	Isolation à la carlite
0,5	0,875	0,97-0,98
0,35	0,850	0,94-0,96
0,28-0,3	-	0,93-0,94

**Tableau II-4**

Pour les tôles d'épaisseur 0,3mm avec une isolation à la carlite, on choisit :  $K_r = 0,94$

$K_g$  :Coefficient géométrique dépendant du nombre de gradins constituant la colonne et de la puissance par colonne, on choisit sa valeur dans le tableau II-5.

$S_c$ [KVA]	<5	4-15	15-45	45-500
Nombre de gradins	2	4	5	6
Diamètre approché	<8	8-12	12-16	16-51
$K_g$	0,786	0,866	0,910	0,930

**Tableau II-5**

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

$$K_u = 0,94 \times 0,93$$

$$K_u = 0,874$$

### II-1-5-e-Induction magnétique de crête $B_c$

On choisit  $B_c$  par rapport à la puissance du transformateur et du type des tôles utilisées. Sa valeur est choisie dans le tableau II-6.

$S_c [KVA]$	10-15	75-250	315-600	630-1000	>1000
B[T] laminée à froid	1,35-1,55	1,55-1,65	1,62-1,68	1,63-1,69	1,64-1,7
B[T] laminée à chaud	1,1-1,35	1,41-1,46	1,42-1,47	-	1,43-1,48

**TableauII-6**

Pour les tôles laminées à froid et d'épaisseur 0,30mm, sa valeur varie entre 1-1,95 T On choisit :

$$B_c = 1,75 \text{ T}$$

### II-1-5-f-Fréquence industriel f

La valeur de la fréquence est imposée par le réseau, elle est égale à :

$$f = 50 \text{ HZ}$$

### II-1-5-g-Calcul de la tension de court circuit réactive $U_{ccr}$

La tension de court circuit a deux composantes :

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

Cette tension s'exprime en fonction de ces composantes par la relation :

$$U_{cc12} = \sqrt{U_{cca}^2 + U_{ccr}^2} \quad (\text{II-21})$$

Donc : 
$$U_{ccr} = \sqrt{U_{cc12}^2 - U_{cca}^2}$$

Avec : 
$$U_{cca} = \frac{P_{cc}}{S_n} \times 100$$

$P_{cc}$  : Pertes en court circuit

$$U_{cca} = \frac{14000}{1250 \cdot 10^3} \cdot 100 \quad (\text{II-22})$$

$$U_{cca} = 1,12 \%$$

D'où

$$U_{ccr} = \sqrt{12,5^2 - 1,12^2}$$

$$U_{ccr} = 12,44 \%$$

Calcul définitif du diamètre de la colonne D :

$$D = 16,4 \sqrt[4]{\frac{416,67 \cdot 0,95 \cdot 16,25}{50 \cdot 12,44 \cdot 1,75^2 \cdot 0,874^2}}$$

$$D = 216mm$$

### II-1-6-Diamètre du canal de fuite

Il est donné par cette expression :

$$D_{12} = a \cdot d_n \quad [mm] \quad (II-23)$$

Avec :

$d_n = 214mm$  : Diamètre normalisé de la colonne.

$a$  : Facteur donné on fonction de la puissance par colonne et de la tension la plus élevée du transformateur. Dans notre cas on le prend égal à 2,5 mm.

$$D_{12} = 535 \text{ mm}$$

- **Section de fer  $S_{fer}$**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$S_{fer} = \frac{\pi \cdot d_n^2}{4} K_u \quad [cm^2] \quad (II-24)$$

$$S_{fer} = \frac{3,14 \cdot 214^2 \cdot 10^{-2}}{4} \cdot 0,874$$

### II-1-7-Hauteur approximative des enroulements $h_B$ $S_{fer} = 314,2 \text{ cm}^2$

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$h_B = \pi \frac{D_{12}}{\beta} \quad [mm] \quad (II-25)$$

$$h_B = 3,14 \frac{535}{2,5}$$

$$h_B = 671,96mm$$

Pour éviter toute contrainte pouvant créer des forces électrodynamiques axiales, et pour faciliter le calage des bobines et des culasses, on choisit les hauteurs des bobines primaires, secondaires et tertiaires les plus proches possibles les unes des autres.

## II-2-Calcul des enroulements [1], [4]

### II-2-1-Tension de spire

Tous les enroulements sont embrassés par le même flux principal, donc on aura la même

tension de spire :  $\frac{V_1}{n_1} = \frac{V_{20}}{n_2} = \frac{V_{30}}{n_3} = U_{SP}$  (voir l'annexe)

On calcul la tension de spire par la formule suivante :

$$U_{SP} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot B_c \cdot S_{fer} \quad [V / spire] \quad (\text{II-26})$$

$$U_{SP} = \sqrt{2} \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 1,75 \cdot 314 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \quad U_{SP} = 12,2 \text{ V}$$

### II-2-2-Nombres de spires

$$\text{❖ Enroulement primaire (triangle) : } n_1 = \frac{U_1}{U_{SP}} = \frac{30 \cdot 10^3}{12,2} \quad (\text{II-27})$$

$$n_1 = 2459,01$$

On prend :  $n_1 = 2459$  spires.

$$\text{❖ Enroulement secondaire (étoile) : } n_2 = \frac{U_2}{U_{SP}} = \frac{398,37}{12,2} \quad (\text{II-28})$$

$$\text{On prend : } n_2 = 33 \text{ spires} \quad n_2 = 32,65$$

$$\text{❖ Enroulement tertiaire (triangle) : } n_3 = \frac{U_3}{U_{SP}} = \frac{690}{12,2} \quad (\text{II-29})$$

$$\text{On prend : } n_3 = 57 \text{ spires} \quad n_3 = 56,55$$

L'arrondissement du nombre de spire influe légèrement sur la tension de spire, néanmoins il faut la recalculer

#### ➤ Recalcul de l'induction de crête

On recalcule l'induction de crête à l'aide de la formule suivante :

$$B_{cr} = \frac{U_{SP}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot S_{fer}} \quad [T] \quad (\text{II-30})$$

$$B_{cr} = \frac{12,2 \cdot 10^4}{\sqrt{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 314,2}}$$

$$B_{cr} = 1,74 \text{ T}$$

### ➤ Calcul de la densité moyenne du courant

$$J_m = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \rho_T \cdot K_{PCC}} \frac{P_{CC}}{S_n} \frac{U_{SP}}{D_{12}} \quad [A/mm^2] \quad (\text{II-31})$$

$P_{CC}$  : Pertes joule [watt].

$K_{PCC}$  : Coefficient tenant compte des pertes supplémentaires, il est fonction de la puissance apparente du transformateur ; Il est tiré du tableau suivant :

$S_n$ [KVA]	30	180	600	1000	1600	2000	2500	4000	6000	10000
$K_{PCC}$	1,020	1,025	1,050	1,060	1,070	1,075	1,080	1,090	1,110	1,125

**Tableau II-8**

Pour un calcul préliminaire, on prend  $K_{PCC} = 1,06$

$\rho_T$  : Résistivité du cuivre à la température considérée, elle de la forme suivante :

$$\rho_T = \rho_{20} [1 + \alpha(T - 20)] \quad [\Omega \cdot m] \quad (\text{II-32})$$

$\alpha$  : Coefficient de température, il est égal à  $3,81 \cdot 10^{-3} \text{ C}^{-1}$ .

$\rho_{20}$  : Résistivité du cuivre à  $20^\circ \text{C}$ , elle est égal à  $0,0178 \text{ } \Omega \cdot m$ .

T : Température de fonctionnement, elle est égale à  $75^\circ \text{C}$ .

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

$$\rho_T = 0,0215 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$$

$$\Rightarrow J_m = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,06 \cdot 0,0215} \frac{14000}{1250} \frac{12,2}{535}$$

$$J_m = 1,8 \text{ A/mm}^2$$

### II-2-3-choix des conducteurs et du type d'enroulement tertiaire

Les conducteurs utilisés sont de type méplat, isolés en papier d'épaisseur 0,45 à 0,5 mm selon la section du conducteur.

#### II-2-3-a-Calcul de la section des conducteurs

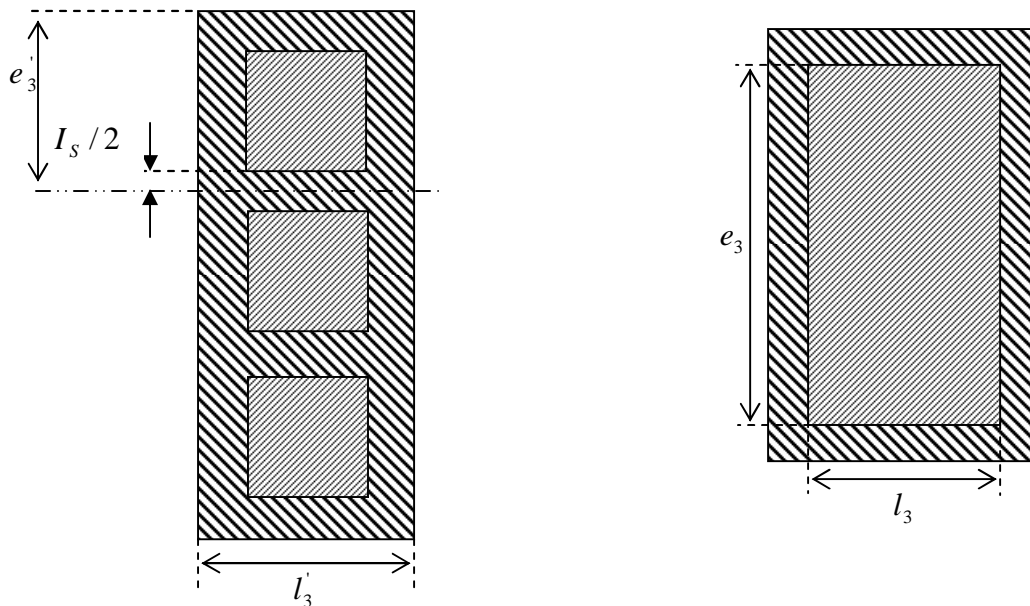
$$S_{con3} = \frac{I_3}{J_m} \quad [mm^2] \quad (II-33)$$

$$S_{con3} = \frac{603,86}{1,8}$$

$$S_{con3} = 335,47 \text{ mm}^2$$

Si la section du conducteur dépasse  $135 \text{ mm}^2$ , on va la diviser par le nombre de conducteurs élémentaires placés en parallèle dont la section ne dépasse pas  $135 \text{ mm}^2$ , donc on divise par 3. Les conducteurs de l'enroulement tertiaire sont des fils méplat, isolés avec un papier d'épaisseur de 0,45 à 0,5 mm suivant la valeur de la section. La section normalisée est prise à partir du tableau II-8.

$$S_{con3n} = 112 \text{ mm}^2 \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} e_3 = 16 \text{ mm} \\ l_3 = 7,1 \text{ mm} \end{cases}$$



**Figure II-1 : Fils méplats avec une disposition à plat (3 conducteurs élémentaires).**

### II-2-3-b-Recalcul de la densité moyenne du courant

La normalisation de la section des conducteurs entraîne une légère variation de la densité du courant, cependant il faut la recalculer en utilisant la relation suivante :

$$J_{mr3} = \frac{I_3}{n \cdot S_{con3n}} = \frac{603,86}{3 \cdot 112} \quad (II-34)$$

$$J_{mr3} = 1,79 \text{ A /mm}^2$$

➤ **L'erreur commise sur la densité du courant :**

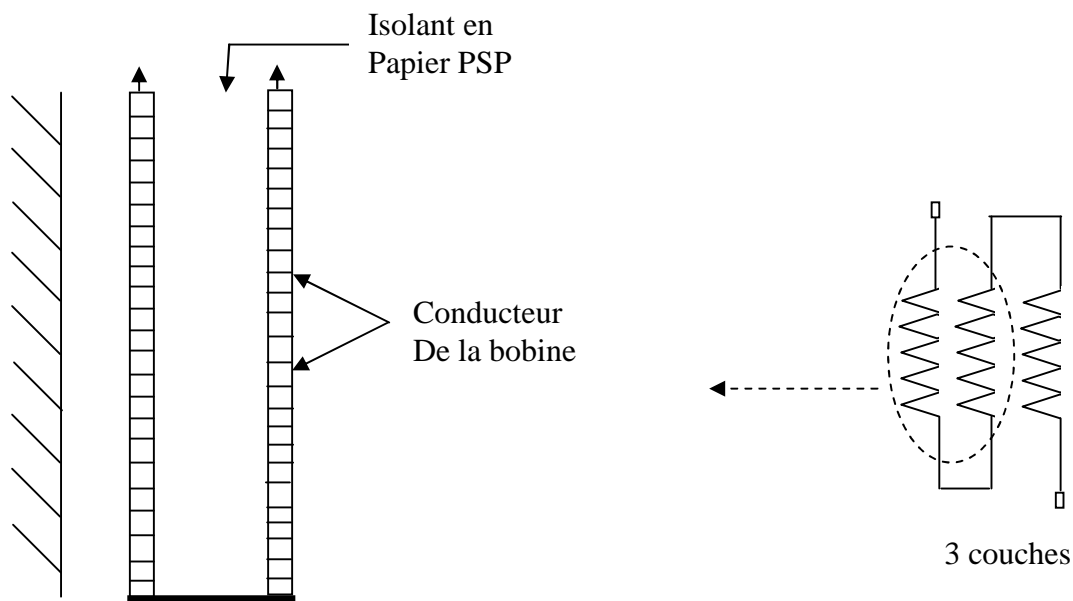
$$\frac{\Delta J_m}{J_m} = \frac{|J_m - J_{mr3}|}{J_m} 100 \quad [\%] \quad (\text{II-35})$$

$$\frac{\Delta J_m}{J_m} = \frac{|1,8 - 1,79|}{1,8} 100$$

$$\frac{\Delta J_m}{J_m} = 0,55 \%$$

### II-2-3-c-Calcul de l'espace nécessaire pour l'enroulement tertiaire

Nous adoptons une disposition à plat des conducteurs, car elle facilite le travail de bobinage et réduit les pertes supplémentaires. Les enroulements basse tension sont des enroulements concentriques à longue couche, comme le montre la figure ci-dessous :



**Figure II-2 : Enroulement concentrique en couche.**

### II-2-3-d-Calcul du nombre de couches

Pour calculer le nombre de couches, on utilise la formule suivante :

$$N_c = \frac{n_3}{N_{sc}} \quad (\text{II-36})$$

$n_3$  : nombre de spires de l'enroulement tertiaire.

$N_{sc}$  : nombre de couches, qui est donné par la formule suivante :

$$N_{sc} = \frac{h_B}{n.e_3} - 1 \quad (\text{II-37})$$

Avec :  $e_3' = e_3 + I_s = 16 + 0,45 = 16,45 \text{ mm}$

$e_3'$  : Épaisseur du conducteur avec isolation.

$n$  : Nombre de conducteurs élémentaires.

$$N_{sc} = \frac{671,96}{3.16,45} - 1$$

$$N_{sc} = 13 \text{ spires / couche}$$

Donc :  $N_c = \frac{57}{13} \qquad N_c = 4 \text{ couches}$

### II-2-3-e-Calcul de l'épaisseur de l'enroulement tertiaire [8]

On calcule l'épaisseur de l'enroulement tertiaire à partir de la formule suivante :

$$a_3 = l_3'.N_c + c \quad [mm] \quad (\text{II-38})$$

Avec :  $l_3' = l_3 + I_s \quad (\text{II-39})$

$l_3'$  : largeur du conducteur avec isolation.

$N_c$  : nombre de conducteurs.

$c$  : Epaisseur du canal de refroidissement.

$$l_3' = 7,1 + 0,45$$

$$l_3' = 7,55 \text{ mm}$$

Donc :  $a_3 = 7,55.4 + 5 \qquad a_3 = 30,2 \text{ mm}$

### II-2-3-f-Calcul de la hauteur définitive de l'enroulement tertiaire

La hauteur définitive de l'enroulement tertiaire est calculée par la relation ci-dessous :

$$h_{B3} = h_m + h_{sp} \quad [mm] \quad (\text{II-40})$$

Avec :  $h_{sp} = n.e_3' \quad [mm] \quad (\text{II-41})$

$$h_m = n.N_{sc}.e_3' \quad [mm] \quad (\text{II-42})$$

$h_{sp}$  : Hauteur d'une spire.

$h_m$  : Hauteur magnétique de l'enroulement.

$$h_m = 641,55 \text{ mm}$$

$$h_{sp} = 49,35 \text{ mm}$$

$$h_{B3} = 690,9 \text{ mm}$$

## II-2-4-Choix des conducteurs et du type d'enroulement secondaire

### II-2-4-a-Calcul de la section des conducteurs

$$S_{con2} = \frac{I_2}{J_m} \quad [mm^2] \quad (II-43)$$

$I_2$  : Courant dans l'enroulement secondaire.

$J_m$  : Densité moyenne du courant.

$$S_{con2} = \frac{1045,88}{1,8} \quad S_{con2} = 581,04 \text{ mm}^2$$

La section du conducteur dépasse  $135 \text{ mm}^2$ , on va la diviser sur le nombre de conducteurs qui égal à 5.

La section normalisée est tirée à partir du tableau II-8.

$$S_{con2n} = 118 \text{ mm}^2 \Rightarrow \begin{cases} e_2 = 14 \text{ mm} \\ l_2 = 8,5 \text{ mm} \end{cases}$$

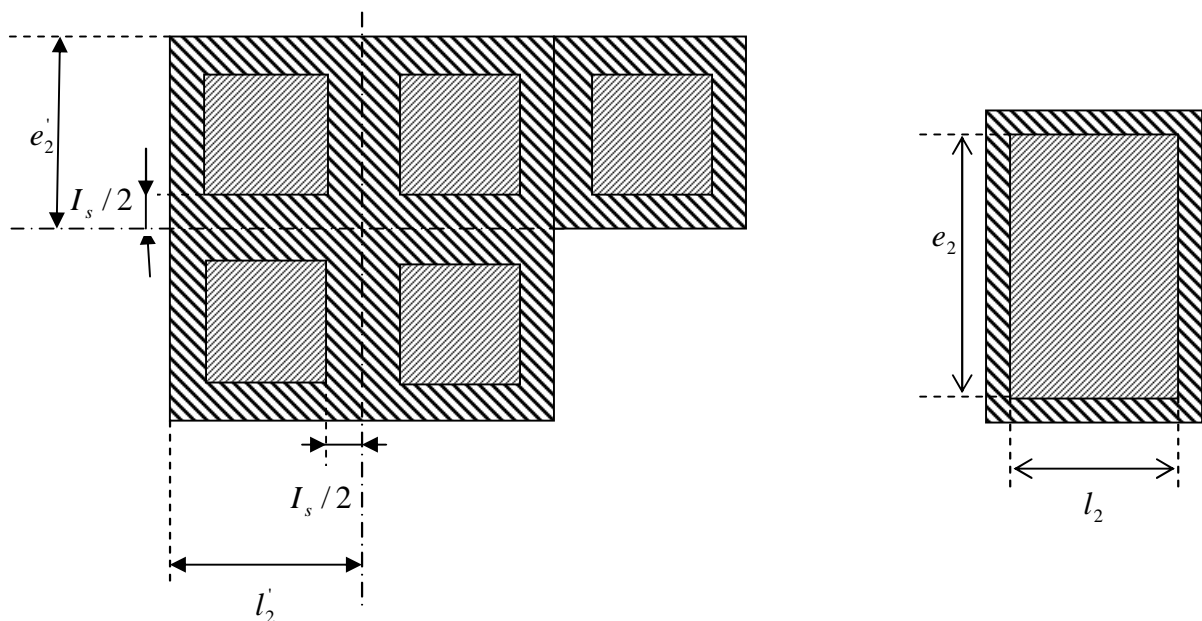


Figure II-3 : Fil méplat avec une disposition à plat (5 conducteurs élémentaires).

### II-2-4-b-Recalcul de la densité moyenne du courant

La normalisation de la section du conducteur entraîne une légère variation de la densité du courant, pour cela il faut la recalculer en utilisant la formule suivante :

$$J_{mr2} = \frac{I_2}{n.S_{con2n}} \quad [A/mm^2] \quad (II-44)$$

$$J_{mr2} = \frac{1045,88}{5.118}$$

$$J_{mr2} = 1,77 A/mm^2$$

➤ **Erreur commise sur la densité du courant :**

Après avoir recalculé la densité du courant, on calculera la valeur de l'erreur relative :

$$\frac{\Delta J_m}{J_m} = \frac{|1,8 - 1,737|}{1,8} \cdot 100$$

$$\frac{\Delta J_m}{J_m} = 1,66 \%$$

L'erreur relative est inférieure à l'erreur admissible qui est égal à 5%.

#### II-2-4-c-Calcul du nombre de couches

Le nombre de couche est donné par la relation suivante :

$$N_{c2} = \frac{n_2}{N_{sc2}} \quad (II-45)$$

$n_2$  : Nombre de spires de l'enroulement secondaire.

$N_{sc2}$  : Nombre de spires par couche qui est donné par la relation suivante :

$$N_{sc2} = \frac{h_B}{n.e'_2} - 1 \quad (II-46)$$

$$\text{Avec : } e'_2 = e_2 + I_s$$

$e'_2$  : Épaisseur du conducteur avec isolation.

$n$  : Nombre de conducteurs élémentaires.

$$e'_2 = 14,45 \text{ mm}$$

$$N_{sc2} = 8 \text{ spires / couche}$$

$$N_{c2} = 4$$

#### II-2-4-d-Epaisseur de l'enroulement secondaire [8]

On calcule l'épaisseur de l'enroulement secondaire à partir de la formule suivante :

$$a_2 = l'_2 \cdot N_{c2} + c \quad [mm] \quad (II-47)$$

$l_2'$  : Largeur du conducteur avec isolation.

$N_c$  : Nombre de conducteurs.

$$a_2 = 40,8mm$$

#### II-2-4-e-Calcul de la hauteur définitive de l'enroulement secondaire

La hauteur définitive de l'enroulement secondaire est donnée par :

$$h_{B2} = h_{m2} + h_{SP} \quad [mm] \quad (II-48)$$

$$\text{Avec : } h_{SP2} = 2.e_2' \quad [mm] \quad (II-49)$$

$$h_{m2} = n.N_{SC2}.e_2' \quad [mm] \quad (II-50)$$

$h_{SP2}$  : hauteur d'une spire.

$h_{m2}$  : hauteur magnétique de l'enroulement.

$$h_{m2} = 578 \text{ mm}$$

$$h_{SP2} = 28,9mm$$

$$h_{B2} = 606,9 \text{ mm}$$

#### II-2-5-Choix des conducteurs et du type d'enroulement primaire

##### II-2-5-a-Calcul de la section du conducteur

$$S_{con1} = \frac{I_1}{J_m} \quad [mm^2] \quad (II-51)$$

$$S_{con1} = \frac{13,88}{1,8}$$

$$S_{con1} = 7,71mm^2$$

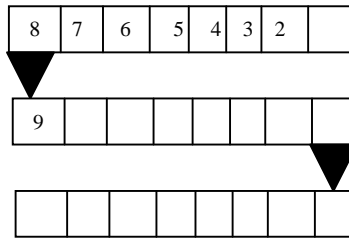
$J_m$  : Densité moyenne du courant.

$I_1$  : Courant dans l'enroulement primaire.

La section normalisée est tirée à partir du tableau II-8 :

$$S_{con1n} = 7,8 \text{ mm}^2 \quad \Rightarrow \begin{cases} e_1 = 5mm \\ l_1 = 1,6mm \end{cases}$$

L'enroulement primaire est bobiné en galettes continues comme le montre les figures suivantes :



**Figure II-4 : Galettes en continues.**

### II-2-5-b-Recalcul de la densité moyenne du courant

La densité moyenne du courant doit être recalculée après avoir arrondi la valeur de la section du conducteur ; l'erreur sur la densité de courant ne doit pas dépasser la valeur admissible 5%. Si elle dépasse cette valeur il faut recalculer le diamètre de la colonne. Cette densité est recalculée en utilisant la formule suivante :

$$J_{mr1} = \frac{I_1}{S_{con1n}} \quad [A/mm^2] \quad (II-52)$$

$$J_{mr1} = \frac{13,88}{7,8}$$

$$J_{mr1} = 1,78 A/mm^2$$

#### ➤ L'erreur commise sur la densité du courant :

Après avoir recalculé la densité du courant, on calculera la valeur de l'erreur relative comme suit :

$$\frac{\Delta J_m}{J_m} = \frac{|J_m - J_{mr1}|}{J_m} 100 =$$

$$\frac{\Delta J_m}{J_m} = 1,11 \quad \%$$

La valeur de l'erreur relative est inférieure à l'erreur admissible qui est de 5%.

### II-2-5-c-Calcul du nombre de galettes

Le nombre de galettes est calculé à l'aide de la relation suivante :

On a en effet 
$$h_{m1} = n_{g1} \cdot e_1' + (n_g - 1)c$$

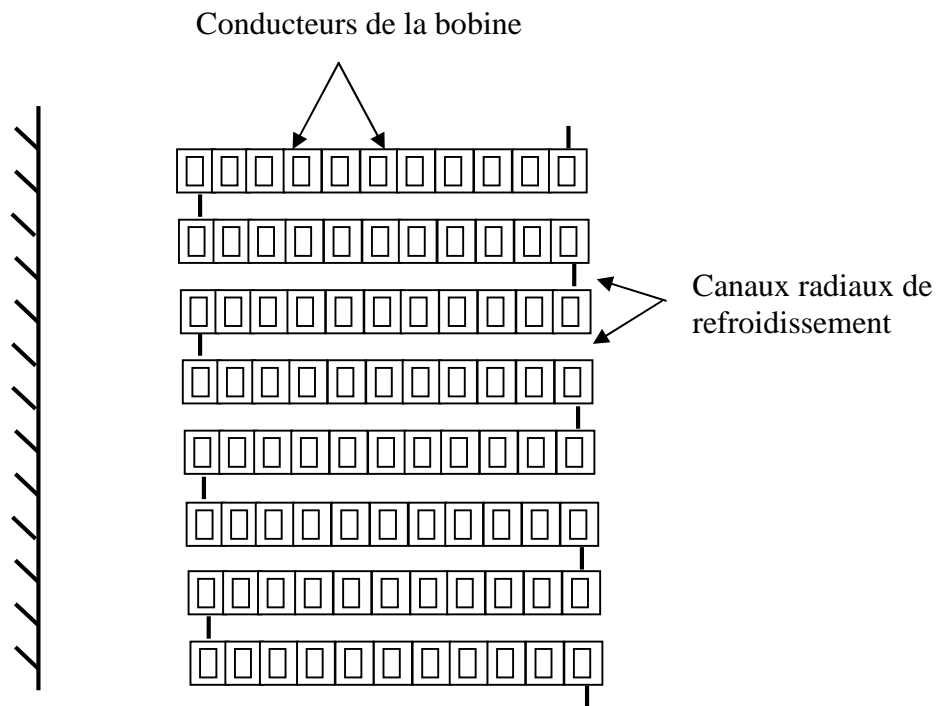
Soit 
$$n_g = \frac{h_{m1} + c}{e_1' + c} = \frac{641,55 + 5}{5,5 + 5} \quad (II-53)$$

$$n_g = 61 \text{ galettes}$$

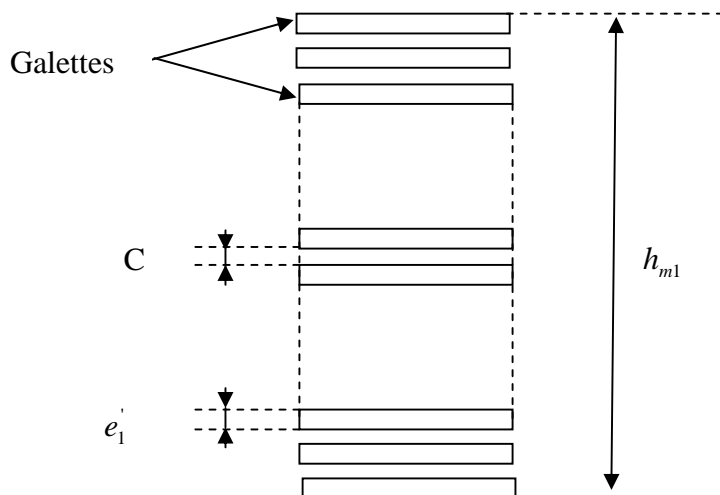
$e_1'$  : Épaisseur du conducteur isolé.

$h_{m1}$  : Hauteur magnétique de l'enroulement.

$c$  : Épaisseur des canaux radiaux de refroidissement, elle est égale à  $5\text{mm}$ .



**Figure II-5-a: Enroulement à galettes continues**



**Figure II-5-b : Enroulement à galettes.**

#### II-2-5-d-Calcul du nombre de spires par galette

On calcule le nombre de spires par galette par la relation suivante :

$$n_{sg} = \frac{n_1}{n_g} \quad [\text{spires / galette}] \quad (\text{II-54})$$
$$n_{sg} = \frac{2459}{61} \quad n_{sg} = 40 \text{spires/galette}$$

$n_1$  : Nombre de spires de l'enroulement primaire.

#### II-2-5-e-Calcul de l'épaisseur de l'enroulement primaire

Elle calculée par la relation suivante :

$$a_1 = n_{sg} \cdot l_1' \quad [mm] \quad (\text{II-55})$$
$$l_1' = 1,6 + 0,5 = 2,1mm$$
$$a_1 = 84 \text{ mm}$$

$a_1$  : Epaisseur de l'enroulement primaire.

$l_1'$  : Largeur du conducteur isolé.

$n_{sg}$  : Nombre de spires par galette.

#### II-2-5-f-Calcul de la hauteur de l'enroulement primaire

La hauteur de l'enroulement primaire sera égale à sa hauteur magnétique ; elle doit être égale au maximum à la hauteur magnétique de l'enroulement tertiaire.

Elle est calculée par la relation suivante :

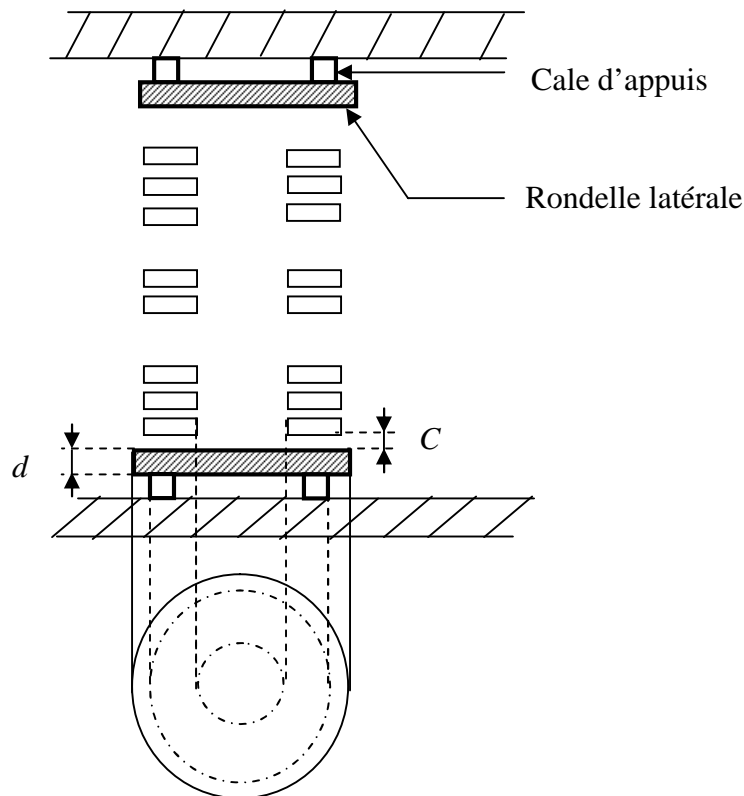
$$h_{B1} = h_{m1} = n_g \cdot e_1' + (n_g - 1)c \quad [mm] \quad (\text{II-56})$$
$$h_{B1} = 635,5mm$$

$n_g$  : Nombre de galettes de l'enroulement primaire.

$e_1'$  : Épaisseur du conducteur isolé.

$c$  : Épaisseur des canaux radiaux de refroidissement.

$h_{m1}$  : C'est la hauteur magnétique de l'enroulement primaire.



**Figure II-6 : Emplacement de l'enroulement primaire sur le circuit magnétique.**

### II-2-5-g-Calcul de la hauteur du montage des bobines

La hauteur du montage des bobines est fixée par rapport à la bobine de la plus grande tension, c'est-à-dire le primaire. Les hauteurs du montage des bobines primaires, secondaires et tertiaires sont égales, sachant que les hauteurs des bobines sont différentes. Elle sera calculée à partir de la formule suivante :

$$H_M = h_{B1} + 2d + 2c \quad [mm] \quad (II-57)$$

$$H_M = 635,5 + 2.60 + 2.5$$

$$H_M = 765,5mm$$

$d$  : Epaisseur de la rondelle en bois comprimé.  $d = 60mm$

$c$  : Epaisseur du canal de refroidissement.  $c = 5mm$ .

### II-2-5-h-Dimensionnement de la cale de progression

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

Pour cela, on utilise les formules suivantes :

$$b_1 = \frac{H_M - h_{B2}}{2} \quad [mm] \quad (II-58)$$

$$b_1 = 79,3mm$$

$$b_2 = b_1 + n.e_1' = 79,3 + 1.5,5mm \quad [mm] \quad (II-59)$$

$$b_2 = 84,8mm$$

La cale de progression est représentée sur la figure suivante :

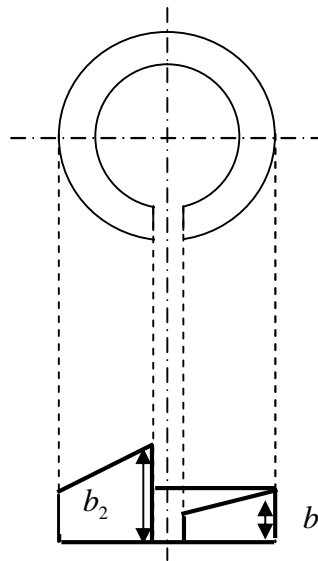


Figure II-7 : Cale de progression.

## II-2-6-Dimensionnement radial des enroulements

### II-2-6-a-Diamètre intérieur de l'enroulement tertiaire $D_{int3}$

$$D_{int3} = d_n + 2a_{03} \quad [mm] \quad (II-60)$$

$$D_{int3} = 214 + 2.5$$

$$a_{03} = 5mm$$

$$D_{int3} = 224 \text{ mm}$$

### II-2-6-b-Diamètre extérieur de l'enroulement tertiaire $D_{ext3}$

$$D_{ext3} = D_{int3} + 2a_3 \quad [mm] \quad (II-61)$$

$$D_{ext3} = 224 + 2.35,2mm$$

$$D_{ext3} = 294,4mm$$

### II-2-6-c-Diamètre intérieur de l'enroulement secondaire $D_{int2}$

$$D_{int2} = D_{ext3} + 2a_{23} \quad [mm] \quad (II-62)$$

$$D_{int2} = 294,4 + 2.18$$

$$a_{23} = 18mm$$

$$D_{int2} = 330,4mm$$

### II-2-6-d-Diamètre extérieur de l'enroulement secondaire $D_{ext2}$

$$D_{ext2} = D_{int2} + 2a_2 \quad [mm] \quad (II-63)$$

$$D_{ext2} = 330,4 + 2.40,8$$

$$D_{ext2} = 412mm$$

### II-2-6-e-Diamètre intérieur de l'enroulement primaire $D_{int1}$ :

$$D_{int1} = D_{ext2} + 2a_{12} \quad [mm] \quad (II-64)$$

$$D_{int1} = 412 + 2.25$$

$$D_{int1} = 462mm$$

### II-2-6-f-Diamètre extérieur de l'enroulement primaire $D_{ext1}$ :

$$D_{ext1} = D_{int1} + 2a_1 \quad [mm] \quad (II-65)$$

$$D_{ext1} = 630mm$$

Les valeurs de  $a_{11}$  et  $a_{12}$  sont tirées à partir du tableau suivant :

	$a_{11}$	$a_{12}$
10 KV	$\geq 8$	$\geq 7,5$
20KV	$\geq 11$	$\geq 9,5$
30KV	$\geq 17$	$\geq 17$

Tableau II-9

## II-3-Dimensionnement du circuit magnétique [4], [8]

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

### II-3-1-Nombre et dimensionnement de gradins :

Le nombre de gradins nécessaire dépend de la puissance apparente du transformateur.

Le nombre de gradins est choisi d'après le tableau II-5 pour le diamètre de la colonne

$D = 21,4$  cm, on prendra  $N_g = 6$  gradins.

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

$$B_{S1} = 0,91D \qquad B_{S1} = 19,47 \text{ cm}$$

$$B_{S2} = 0,83D \qquad B_{S2} = 17,76 \text{ cm}$$

$$B_{S3} = 0,70D \qquad B_{S3} = 14,98 \text{ cm}$$

$$B_{S4} = 0,58D \qquad B_{S4} = 12,41 \text{ cm}$$

$$B_{S5} = 0,45D \qquad B_{S5} = 09,63 \text{ cm}$$

$$B_{S6} = 0,29D \qquad B_{S6} = 6,206 \text{ cm}$$

- Pour déterminer les hauteurs des gradins, on applique le théorème de Pythagore, d'après la figure II-8 on déduit :

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

$$H_{S1} = \sqrt{D^2 - B_{S1}^2}$$

$$H_{S1} = 8,88 \text{ cm}$$

$$H_{S2} = \sqrt{D^2 - B_{S2}^2}$$

$$H_{S2} = 11,93 \text{ cm}$$

$$H_{S3} = \sqrt{D^2 - B_{S3}^2}$$

$$H_{S3} = 15,28 \text{ cm}$$

$$H_{S4} = \sqrt{D^2 - B_{S4}^2}$$

$$H_{S4} = 17,43 \text{ cm}$$

$$H_{S5} = \sqrt{D^2 - B_{S5}^2}$$

$$H_{S5} = 19,11 \text{ cm}$$

$$H_{S6} = \sqrt{D^2 - B_{S6}^2}$$

$$H_{S6} = 20,48 \text{ cm}$$

### II-3-2-Longueur de la fenêtre $l_f$

Elle est calculée par la formule suivante :

$$L_f = D_{ext1} + a_{11} - B_{S1} \quad [cm] \quad L_f = 46,23cm \quad (II-66)$$

$a_{11}$  : C'est la distance latérale entre deux enroulements haute tension voisins qui égale à 27mm.

$B_{S1}$  : Largeur des gradins.

### II-3-3-Hauteur de la fenêtre $H_c$ :

$$H_c = h_{B1} + L_0 \quad [cm] \quad (II-67)$$

Avec :  $L_0=13$  cm

$$H_c = 76,55cm$$

### II-3-4-Hauteur du noyau $H_n$

$$H_n = H_c + 2B_{S1} \quad (II-68)$$

$$H_n = 115,49cm$$

### II-3-5-Longueur entre axes des colonnes $L_c$

$$L_c = L_f + B_{S1} \quad [cm] \quad (II-69)$$

$$L_c = 65,7cm$$

### II-3-6-Longueur du noyau $L_n$

$$L_n = L_c + B_{S1} \quad [cm] \quad (II-70)$$

$$L_n = 85,17$$

### II-3-7-Section de la culasse $S_j$

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

Pour le calcul de cette section on utilise la formule suivant :

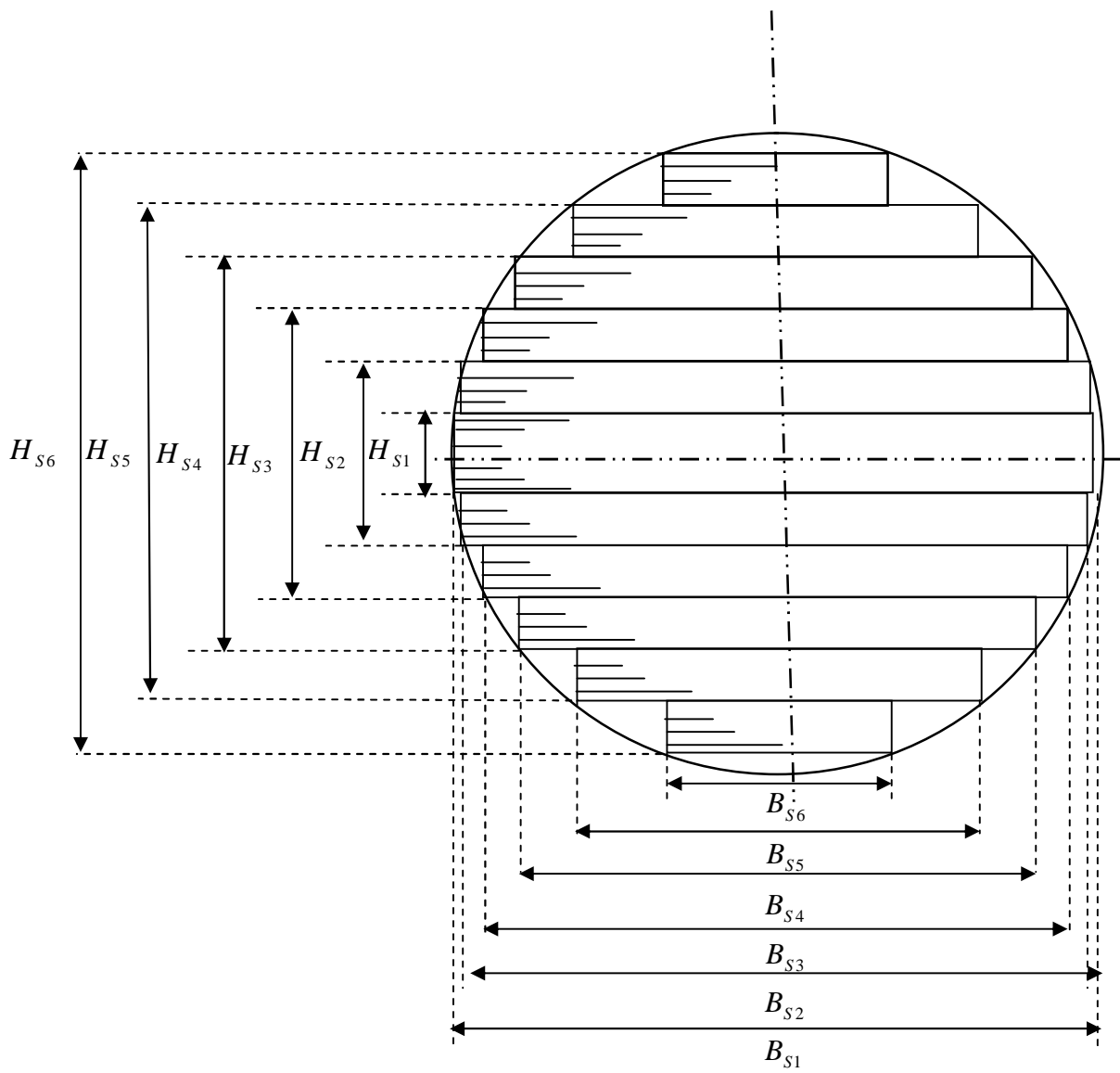
$$S_j = 1,17S_{fer} \quad [cm^2] \quad (II-71)$$

$B_j$  : Induction dans la culasse.

$S_{fer}$  : Section des colonnes.

$S_j$  : Section de la culasse.

$B_c$  : Induction dans la colonne.



**Figure II-8 : Représentation des gradins.**

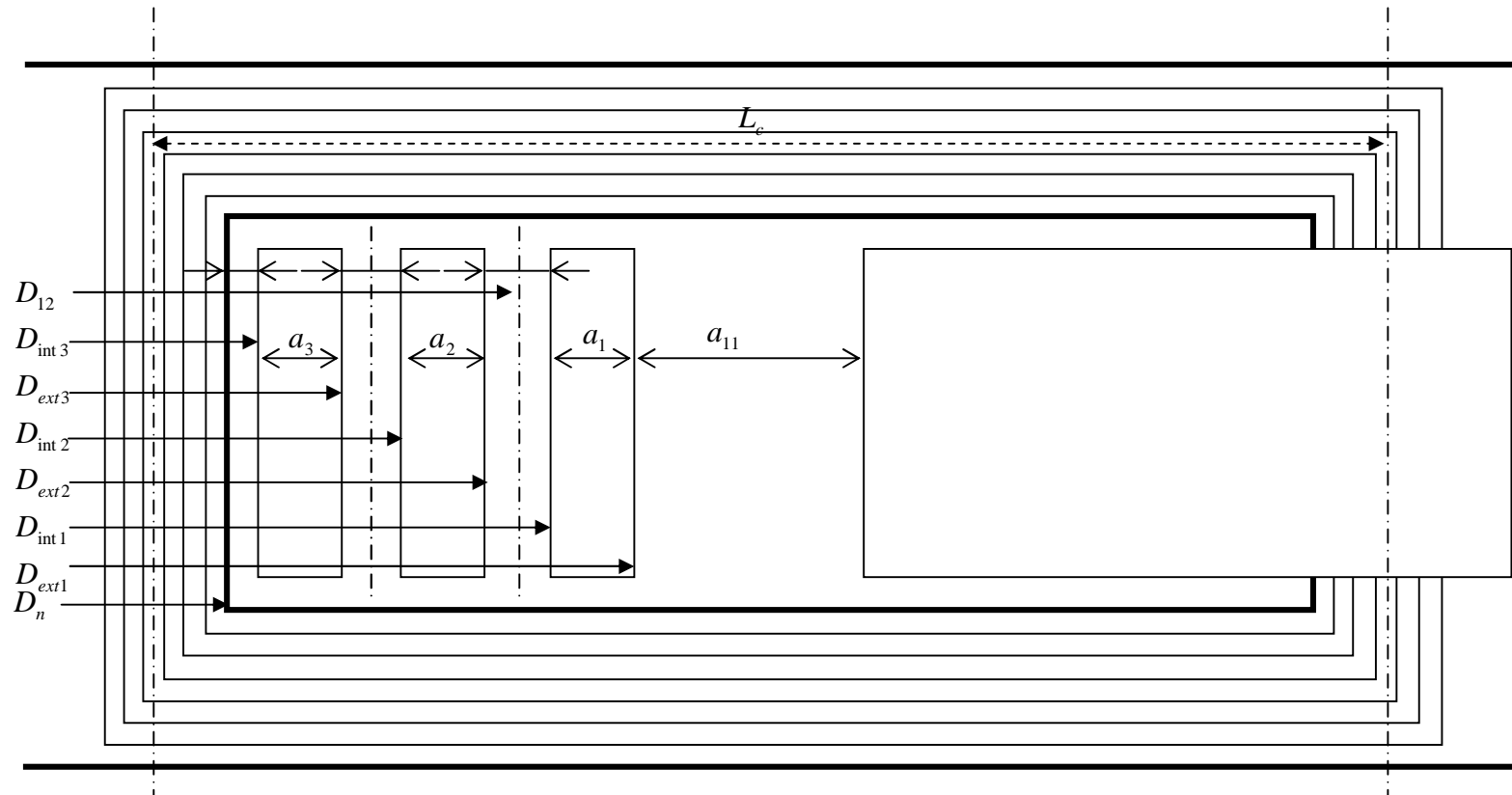


Figure II-9 : Présentations des dimensions de la partie active.

<b>l/e</b>	<b>4,5</b>	<b>5,0</b>	<b>5,6</b>	<b>6,3</b>	<b>7,1</b>	<b>8,0</b>	<b>9,0</b>	<b>10,0</b>	<b>11,2</b>	<b>11,8</b>	<b>12,5</b>	<b>13,2</b>	<b>14,0</b>	<b>15,0</b>	<b>16,0</b>
<b>1,0</b>			5,4	6,1	6,9										
<b>1,12</b>			6,1	6,8	7,7										
<b>1,25</b>	5,4	6,0	6,8	7,7	8,7										
<b>1,4</b>	6,1	6,8	7,6	8,7	9,7	11,0									
<b>1,6</b>	7,0	7,8	8,7	9,9	11,2	12,0									
<b>1,8</b>	7,7	8,6	9,7	11,0	12,4	14,0	15,8								
<b>2,0</b>	8,6	9,6	10,8	12,2	13,8	15,6	17,6								
<b>2,24</b>	9,7	10,8	12,2	13,8	15,5	17,6	19,8	22,0							
<b>2,5</b>		12,0	13,5	15,2	17,2	19,4	22,0	24,4							
<b>2,8</b>		13,4	15,5	17,1	19,3	21,8	24,6	27,4	<b>30,8</b>						
<b>3,15</b>		15,2	17,1	19,3	21,8	24,6	27,8	<b>31,0</b>	<b>34,7</b>	<b>36,6</b>	<b>38,8</b>				
<b>3,55</b>			19,3	21,8	24,7	27,8	<b>31,4</b>	<b>35,5</b>	<b>39,2</b>	<b>41,3</b>	<b>43,8</b>	<b>46,3</b>	<b>49,2</b>		
<b>4,0</b>				24,3	27,5	<b>31,4</b>	<b>35,1</b>	<b>39,1</b>	<b>43,9</b>	<b>46,3</b>	<b>49,1</b>	<b>51,9</b>	<b>55,1</b>	<b>59,1</b>	<b>63,1</b>
<b>4,5</b>					<b>31,4</b>	<b>35,1</b>	<b>39,6</b>	<b>44,1</b>	<b>49,5</b>	<b>52,2</b>	<b>55,4</b>	<b>58,5</b>	<b>62,1</b>	<b>66,6</b>	<b>71,1</b>
<b>5,0</b>					<b>34,6</b>	<b>39,1</b>	<b>44,1</b>	<b>49,1</b>	<b>55,1</b>	<b>58,1</b>	<b>61,6</b>	<b>65,1</b>	<b>69,1</b>	<b>74,1</b>	<b>79,1</b>
<b>5,6</b>						<b>43,9</b>	<b>49,5</b>	<b>55,1</b>	<b>61,9</b>	<b>65,2</b>	<b>69,1</b>	<b>73,1</b>	<b>77,5</b>	<b>83,1</b>	<b>88,7</b>
<b>6,3</b>						<b>49,1</b>	<b>55,4</b>	<b>61,7</b>	<b>69,2</b>	<b>73,0</b>	<b>77,4</b>	<b>81,8</b>	<b>86,9</b>	<b>93,1</b>	<b>99,5</b>
<b>7,1</b>							<b>62,6</b>	<b>69,7</b>	<b>78,2</b>	<b>82,4</b>	<b>87,4</b>	<b>92,4</b>	<b>98,1</b>	<b>105,0</b>	<b>112,0</b>
<b>8,0</b>									<b>88,3</b>	<b>93,1</b>	<b>98,7</b>	<b>104,0</b>	<b>111,0</b>	<b>119,0</b>	<b>127,0</b>
<b>8,5</b>											<b>105,0</b>		<b>118,0</b>		<b>135,0</b>

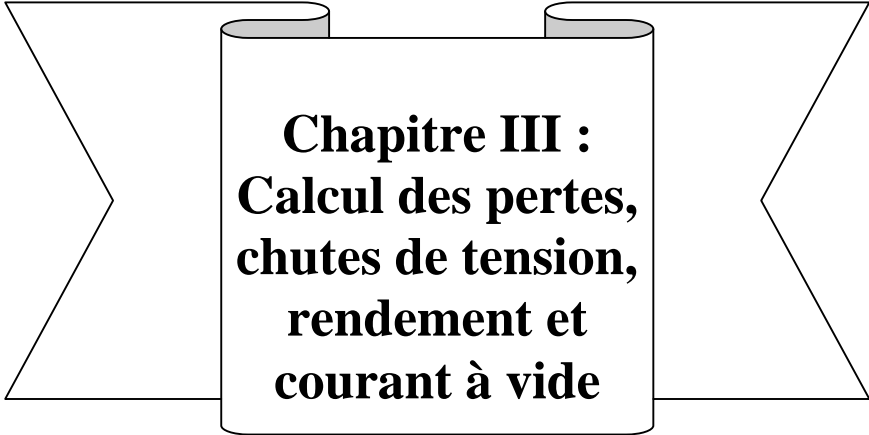
**Tableau II-8 : Section des conducteurs méplat  $[mm^2]$ .**

$e$  : Épaisseur des conducteurs [mm].

$l$  : La largeur des conducteurs [mm].

L'écriture en gras l'isolation est de 0,5 mm.

L'écriture normale l'isolation est de 0,45 mm.



**Chapitre III :  
Calcul des pertes,  
chutes de tension,  
rendement et  
courant à vide**

## Introduction

Comme toutes les machines électriques, un transformateur est formé de fer et de cuivre.

Puisqu'il est statique, il est le siège de pertes dans le cuivre sans pertes mécaniques.

Ces pertes influent directement sur son rendement et provoquent l'échauffement de ces parties constitutives.

Dans ce chapitre, nous allons calculer les pertes comme suit :

### III.1. Pertes à vide [4], [7]

Bien que le circuit magnétique soit constitué par un empilage de minces tôles d'acier spécial, il existe des pertes magnétiques comportant les pertes par courant de Foucault et les pertes par hystérésis.

Ces pertes comprennent les pertes principales et les pertes supplémentaires.

#### III.1.1. Poids du noyau

Pour calculer le poids du noyau, on le divise en trois parties différentes (colonne, culasse et coins) figure (III-1).

$$G_n = G_1 + G_2 + G_3 \quad [kg] \quad (III-1)$$

##### III.1.1.1. Poids des coins $G_1$ :

$$G_1 = \gamma_{fer} V_1 \quad [kg] \quad (III-2)$$

$$V_1 = N_1 B_{S1} S_{fer} \quad [dm^3] \quad (III-3)$$

$\gamma_{fer}$  : Masse volumique de la tôle utilisée qui est égal à  $7,65 [kg/dm^3]$

$N_1$  : Nombre de coins.

$V_1$  : Volume total des coins  $[dm^3]$

$$V_1 = 6.1,947.3,142 = 36,70dm^3$$

$$G_1 = 36,70.7,65 = 280,79Kg$$

##### III.1.1.2. Poids des culasses $G_2$

$$G_2 = \gamma_{fer} V_2 \quad [kg] \quad (III-4)$$

$$V_2 = 4.L_f .S_{fer} \quad [dm^3] \quad (III-5)$$

$V_2$  : volume total des culasses

$S_{fer}$  : Section de fer.

$$V_2 = 58,10dm^3$$

$$G_2 = 444,46Kg$$

### III.1.1.3. Poids des colonnes $G_3$

$$G_3 = \gamma_{fer} \cdot V_3 \quad [kg] \quad (III-6)$$

$$V_3 = 3 \cdot H_c \cdot S_{fer} \quad [dm^3] \quad (III-7)$$

$V_3$ : Volume total des colonnes  $[kg/dm^3]$

$H_c$  : Hauteur de la colonne

$$V_3 = 72,15dm^3$$

$$G_3 = 551,94Kg$$

$$G_n = 1277,19Kg$$

### III.1.2. Pertes principales dans le noyau

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{10} = \sigma_{1,5} \cdot K_{BP} \cdot G_n \quad [W] \quad (III-8)$$

$\sigma_{1,5}$  : Pertes spécifique pour une induction de 1,5 T, sa valeur est évaluée de 0,97 W/kg .

$$\sigma_{1,5} = 0,97 W/kg .$$

$K_{BP}$  : Coefficient correcteur des pertes spécifique pour une induction de 1.75 T, sa valeur est donnée par le tableau suivant :

B [T]	$K_{BP}$
$0.5 \leq B_c \leq 1.1$	$K_{BP} = 0.413 B_c^2$
$1.1 \leq B_c \leq 1.5$	$K_{BP} = 0.0758 e^{1.72 B_c}$
$1.5 \leq B_c \leq 1.8$	$K_{BP} = 0.0536 e^{1.95 B_c}$
$1.8 \leq B_c \leq 2$	$K_{BP} = 0.01126 e^{2.81 B_c}$

**Tableau III-1 : Coefficient correcteur des pertes spécifiques  $K_{BP}$  en fonction de l'induction B.**

$$K_{BP} = 0,0536 e^{1,95 \cdot 1,75}$$

$$K_{BP} = 1,06$$

$$P_{10} = 1313,20W$$

### III.1.3. Pertes supplémentaires

#### III.1.3.1. Pertes supplémentaires dans les coins

Elles sont évaluées à 50% des pertes principales, leur cause est due à la non continuité du circuit magnétique qui présente un entre fer, donc une distorsion des lignes du champ, ces derniers sont déviés par rapport au sens de laminage.

$$P_{S1} = 0,5\sigma_{1,5} \cdot K_{BP} \cdot G_1 \quad [W] \quad (III-10)$$

$$P_{S1} = 144,35W$$

#### III.1.3.2. Pertes supplémentaires dans les colonnes et les culasses

Elles sont évaluées à 15% des pertes principales, elles sont dues à la variation de la structure des tôles lors de leurs usinages et aux accessoires de fixation du noyau.

$$P_{S2} = 0,15\sigma_{1,5} K_{BP} (G_2 + G_3) \quad [W] \quad (III-11)$$

$$P_{S2} = 153,67W$$

#### III.1.3.3. Pertes fer totales

$$P_{0c} = P_{10} + P_{S1} + P_{S2} \quad [W] \quad (III-12)$$

$$P_{0c} = 1611,22W$$

$P_{0c} < P_{0g}$  Pertes à vide conforme aux données du cahier des charges.

## III.2. Pertes joules [4]

Les pertes joules sont causées par les courants qui circulent dans les enroulements. Pour les transformateurs à trois enroulements, ces pertes joules sont calculées pour les trois paires d'enroulements (haute tension – basse tension « secondaire », haute tension – basse tension « tertiaire ») de la même manière qu'un transformateur à deux enroulements.

A la fin on prendra la plus grande valeur des deux.

### III.2.1. Calcul des résistances des enroulements

#### III.2.1.1. Enroulement tertiaire

- Diamètre moyen d'une spire :

$$D_{m3} = d_n + 2a_{03} + a_3 \quad [m] \quad (III-13)$$

$$D_{m3} = 0,259m$$

- Longueur moyenne d'une spire :

$$L_{m3} = \pi \cdot D_{m3} \quad [m] \quad (III-14)$$

$$L_{m3} = 0,813m$$

- **Longueur totale de l'enroulement tertiaire :**

$$L_{t3} = L_{m3} \cdot n_3 \quad [m] \quad (\text{III-15})$$

$n_3$  : Nombre de spires de l'enroulement

$$L_{t3} = 46,34m$$

- **Résistance de l'enroulement tertiaire :**

$$r_3 = \rho_{75} \frac{L_{t3}}{n \cdot S_{con3n}} \quad [\Omega] \quad (\text{III-16})$$

$\rho_{75}$  : Résistivité du cuivre :

$$\text{A } 75^\circ\text{c} \quad \rho_{75} = 0,0215\Omega \cdot \text{mm}^2 / m$$

$S_{con3n}$  : Section du conducteur normalisée

$n$  : Nombre de conducteurs élémentaires

$$r_3 = 0,0029 \Omega$$

- **Poids de l'enroulement tertiaire  $G_{c3}$  :**

$$G_{c3} = \delta \cdot L_{t3} \cdot S_{con3n} \cdot n \quad [kg] \quad (\text{III-17})$$

$\delta$  : Poids spécifique du cuivre :  $\delta = 8,9 [kg/dm^3]$

$$G_{c3} = 138,57Kg$$

### III-2.1.2. Enroulement secondaire

- Diamètre moyenne d'une spire :

$$D_{m2} = d_n + 2a_{03} + 2a_{23} + 2a_3 + a_2 \quad [m] \quad (\text{III-18})$$

$$D_{m2} = 0,371m$$

- Longueur moyenne d'une spire :

$$L_{m2} = \pi \cdot D_{m2} \quad [m] \quad (\text{III-19})$$

$$L_{m2} = 1,16m$$

- **Longueur totale de l'enroulement secondaire :**

$$L_{t2} = L_{m2} \cdot n_2 \quad [m] \quad (\text{III-20})$$

$n_2$  : Nombre de spires de l'enroulement secondaire

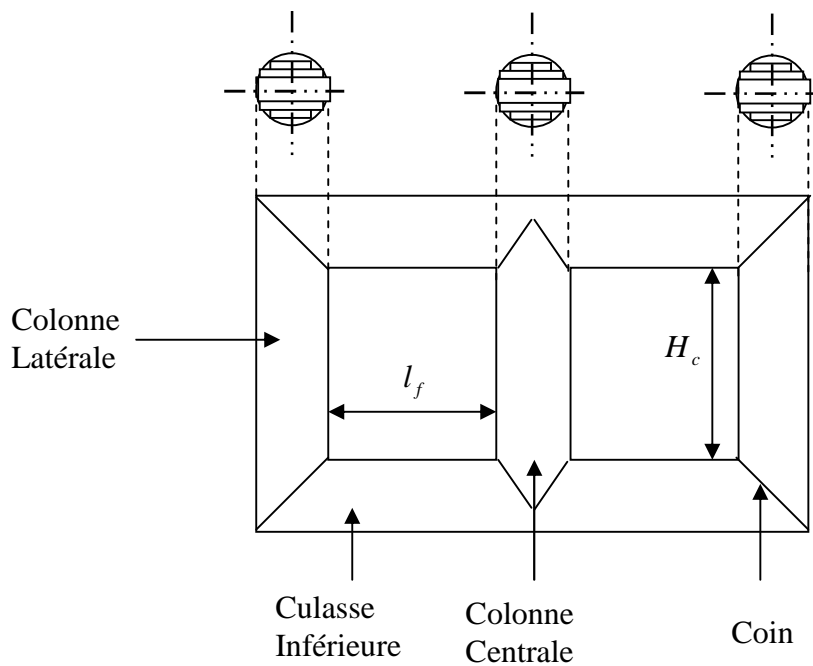
$$L_{t2} = 38,28m$$

- **Résistance de l'enroulement secondaire :**

$$r_2 = \rho_{75} \frac{L_{t2}}{n \cdot S_{con2n}} \quad [\Omega] \quad (\text{III-21})$$

$S_{con3n}$  : Section du conducteur normalisée

$$r_2 = 0,0013 \Omega$$



**Figure III-1 : Les différentes parties du noyau.**

**Poids de l'enroulement secondaire  $G_{c2}$  :**

$$G_{c2} = \delta \cdot L_{t2} \cdot S_{con2n} \cdot n \quad [kg] \quad (\text{III-22})$$

$\delta$  : Poids spécifique du cuivre :  $\delta = 8,9 [kg/dm^3]$

$$G_{c2} = 201Kg$$

### III.2.1.3. Enroulement primaire

- **Diamètre moyenne d'une spire :**

$$D_{m1} = d_n + 2a_{03} + 2a_{23} + 2a_2 + a_1 \quad [m] \quad (\text{III-23})$$

$$D_{m1} = 0,546m$$

- **Longueur moyenne d'une spire :**

$$L_{m1} = \pi \cdot D_{m1} \quad [m] \quad (\text{III-24})$$

$$L_{m1} = 1,71m$$

- **Longueur totale de l'enroulement primaire :**

$$L_{t1} = L_{m1} \cdot n_1 \quad [m] \quad (\text{III-25})$$

$$L_{t1} = 4204,89m$$

- **Résistance de l'enroulement primaire :**

$$r_1 = \rho_{75} \frac{L_{t1}}{n \cdot S_{con1n}} \quad [\Omega] \quad (\text{III-26})$$

$S_{con1n}$  : Section du conducteur normalisée

$$r_1 = 11,59\Omega$$

- **Poids de l'enroulement primaire  $G_{c1}$  :**

$$G_{c1} = \delta \cdot L_{t1} \cdot S_{con1n} \cdot n \quad [kg] \quad (\text{III-27})$$

$\delta$  : Poids spécifique du cuivre :  $\delta = 8,9 [kgldm^3]$

$$G_{c1} = 291,91Kg$$

- **Poids total du cuivre  $G_{cn}$  :**

$$G_{cn} = G_{c1} + G_{c2} + G_{c3} \quad [kg] \quad (\text{III-28})$$

$$G_{cn} = 631,47Kg$$

### III.2.2. Pertes joules dans l'enroulement tertiaire

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{cc3t} = K_{sup3} P_{cc3} + P_{conx3} \quad [W] \quad (\text{III-29})$$

Avec :

$P_{cc3}$  : Pertes principales dans l'enroulement tertiaire.

$P_{conx3}$  : Pertes par connexion. Se sont des pertes dues à la résistance des fils qui relient les différentes phases du transformateur.

$K_{sup3}$  : Coefficient tenant compte des pertes supplémentaires qui sont dues à l'effet de peau électrique (ou l'effet pelliculaire).

- **Pertes principales dans l'enroulement tertiaire :**

$$P_{cc3} = c \cdot K \cdot G_{c3} \cdot J_{mr3}^2 \quad [W] \quad (\text{III-30})$$

Avec :

$c$  : Nombre de phases qui sont égale à trois (3).

$J_{mr3}$  : Densité moyenne de courant dans l'enroulement tertiaire.

$K$  : facteur tenant compte de la conductivité du cuivre à une température de 75% C

Pour le cuivre :  $K=2,4$

$$P_{cc3} = 3196,74W$$

▪ **Calcul du coefficient des pertes supplémentaires dans l'enroulement tertiaire :**

$$K_{sup3} = 1 + 0,095\beta^2 l_3^4 (N_{c3} - 0,2)^2 \quad (III-31)$$

Avec :

$l_3$  : Largeur du conducteur.

$N_{c3}$  : Nombre de couche.

$\beta$  : Coefficient qui est donné par la relation suivante.

$$\beta = \frac{e_3 \cdot n_{sc3}}{h_{B3}} \quad (III-32)$$

$e_3$  : Épaisseur du conducteur.

$n_{sc3}$  : Nombre de spires couche.

$$\beta = 0,3$$

$$K_{sup3} = 1,034$$

▪ **Pertes par connexion :**

Elles sont données par :

$$P_{conx3} = K \cdot J_{mr3}^2 \cdot G_{conx3} \quad [W] \quad (III-33)$$

▪ **Longueur du fil de connexion :**

Pour une connexion triangle, elle est donnée par la relation suivante :

$$L_{conx3} = 14 \cdot h_{B3} \quad [m] \quad (III-34)$$

$$L_{conx3} = 9,67m$$

▪ **Section du conducteur de connexion :**

$$S_{conx3} = \sqrt{3} \cdot S_{con3n} \cdot n \quad [mm^2] \quad (III-35)$$

$$S_{conx3} = 581,96mm^2$$

▪ **Résistance du fil de connexion :**

$$R_{conx3} = \rho_{75} \frac{L_{conx3}}{S_{conx3}} \quad [\Omega] \quad (III-36)$$

$$G_{conx3} = 0,00035 \quad \Omega$$

- **Poids du fil de connexion :**

$$G_{conx3} = \delta \cdot S_{conx3} \cdot L_{conx3} \quad [kg] \quad (III-37)$$

$$G_{conx3} = 50,08Kg$$

$$P_{conx3} = 385,10 W$$

$$P_{cc3t} = 3690,52 W$$

### III.2.3. Pertes joules dans l'enroulement secondaire

Les pertes joules dans l'enroulement secondaire sont données par la relation suivante :

$$P_{cc2t} = K_{sup2} P_{cc2} + P_{conx2} + P_{sup} \quad [W] \quad (III-38)$$

Avec :

$P_{cc2}$  : Pertes principales dans l'enroulement secondaire.

$P_{conx2}$  : Pertes par connexion, Ce sont des pertes dues à la résistance des fils qui relient les différentes phases du transformateur.

$K_{sup2}$  : Coefficient tenant compte des pertes supplémentaires qui sont dues à l'effet de peau électrique (ou l'effet pelliculaire).

- **Pertes principales dans l'enroulement secondaire:**

$$P_{cc2} = c \cdot K \cdot G_{c2} \cdot J_{mr2}^2 \quad [W] \quad (III-39)$$

Avec :

C : nombre de phases qui sont égale à trois (3).

$J_{mr2}$  : Densité moyenne de courant dans l'enroulement secondaire.

K : facteur tenant compte de la conductivité du cuivre à une température de 75% C

Pour le cuivre :  $K=2,4$

$$P_{cc2} = 4533,93W$$

- **Calcul du coefficient des pertes supplémentaires dans l'enroulement secondaire:**

$$K_{sup2} = 1 + 0,095 \beta^2 l_2^4 (N_{c2} - 0,2)^2 \quad (III-40)$$

Avec :

$l_2$  : Largeur du conducteur.

$N_{c2}$  : Nombre de couche.

$\beta$  : Coefficient qui est donné par la relation suivante.

$$\beta = \frac{e_2 \cdot N_{sc2}}{h_{B2}} \quad (\text{III-41})$$

$e_2$  : Épaisseur du conducteur.

$n_{sc2}$  : Nombre de spires couche.

$$\beta = 0,18$$

$$K_{\text{sup}2} = 1,023$$

▪ **Pertes par connexion :**

Elles sont données par :

$$P_{\text{con}x2} = K \cdot J_{mr2}^2 \cdot G_{\text{con}x} \quad [W] \quad (\text{III-42})$$

▪ **Longueur du fil de connexion :**

Pour une connexion étoile, elle est donnée par la relation suivante :

$$L_{\text{con}x2} = 7,5 \cdot h_{B2} \quad [m] \quad (\text{III-43})$$

$$L_{\text{con}x2} = 4,55m$$

▪ **Section du conducteur de connexion :**

$$S_{\text{con}x2} = S_{\text{con}2n} \cdot n \quad [mm^2] \quad (\text{III-44})$$

$$S_{\text{con}x2} = 590mm^2$$

▪ **Résistance du fil de connexion :**

$$R_{\text{con}x2} = \rho_{75} \frac{L_{\text{con}x2}}{S_{\text{con}x2}} \quad [\Omega] \quad (\text{III-45})$$

$$R_{\text{con}x2} = 0,00016 \Omega$$

▪ **Poids du fil de connexion :**

$$G_{\text{con}x2} = \delta \cdot S_{\text{con}x2} \cdot L_{\text{con}x2} \quad [kg] \quad (\text{III-46})$$

$$G_{\text{con}x2} = 23,89Kg$$

$$P_{\text{con}x2} = 179,62W$$

▪ **Les pertes supplémentaires dans l'enroulement secondaire:**

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

$$P_{\text{sup}} = (K_{\text{sup}22} - 1)P_{\text{cc}2} \quad [W] \quad (\text{III-47})$$

$K_{\text{sup}22}$  : Coefficient tenant compte des pertes supplémentaires, il est donné par la relation.

$$\text{Suivante : } K_{\text{sup}22} = 1 + 5,2\beta^2 \left[ \frac{f}{\rho_{75} 10^4} \right]^2 l^4 (n_{ng} - 0,5)^2 \quad (\text{III-48})$$

$$K_{\text{sup}22} = 1,32$$

$$P_{\text{sup}} = 1450,85W$$

$$P_{\text{cc}2t} = 6268,68W$$

### III.2.4. Pertes joules dans l'enroulement primaire

Sont données par la relation suivante :

$$P_{\text{cc}1t} = K_{\text{sup}1} P_{\text{cc}1} + P_{\text{con}x1} \quad [W] \quad (\text{III-49})$$

Avec :

$P_{\text{cc}1}$  : Pertes principales dans l'enroulement primaire.

$P_{\text{con}x}$  : Pertes par connexion, Ce sont des pertes dues à la résistance des fils qui relient les différentes phases du transformateur.

$K_{\text{sup}1}$  : Coefficient tenant compte des pertes supplémentaires qui sont dues à l'effet de peau électrique (ou l'effet pelliculaire).

#### ▪ Pertes principales dans l'enroulement primaire

$$P_{\text{cc}1} = c \cdot K \cdot G_{c1} \cdot J_{mr1}^2 \quad [W] \quad (\text{III-50})$$

Avec :

C : nombre de phases qui sont égales à trois (3).

$J_{mr1}$  : Densité moyenne de courant dans l'enroulement primaire.

K : facteur tenant compte de la conductivité du cuivre à une température de 75% C

Pour le cuivre :  $K=2,4$

$$P_{\text{cc}1} = 6658,96W$$

#### ▪ Calcul du coefficient des pertes supplémentaires dans l'enroulement secondaire:

$$K_{\text{sup}1} = 1 + 0,095\beta^2 l_1^4 (n_{g1} - 0,2)^2 \quad (\text{III-51})$$

Avec :

$l_1$  : Largeur du conducteur.

$n_{sg1}$  : Nombre de couche.

$\beta$  : Coefficient qui est donné par la relation suivante.

$$\beta = \frac{e_1 \cdot N_{sg1}}{h_{B1}} \quad (\text{III-52})$$

$e_1$  : Épaisseur du conducteur.

$n_{sg1}$  : Nombre de spires couche.

$$\beta = 0,31$$

$$K_{sup1} = 1,02$$

▪ **Pertes par connexion :**

Elles sont données par :

$$P_{conx1} = K \cdot J_{mr1}^2 \cdot G_{conx1} \quad [W] \quad (\text{III-53})$$

▪ **Longueur du fil de connexion :**

Pour une connexion étoile, elle est donnée par la relation suivante :

$$L_{conx1} = 14 \cdot h_{B1} \quad [m] \quad (\text{III-54})$$

$$L_{conx1} = 8,89m$$

▪ **Section du conducteur de connexion :**

$$S_{conx1} = \sqrt{3} \cdot S_{con1n} \quad [mm^2] \quad (\text{III-55})$$

$$S_{conx1} = 13,49 mm^2$$

▪ **Résistance du fil de connexion :**

$$R_{conx1} = \rho_{75} \frac{L_{conx1}}{S_{conx1}} \quad [\Omega] \quad (\text{III-56})$$

$$R_{conx1} = 0,014 \Omega$$

▪ **Poids du fil de connexion :**

$$G_{conx1} = \delta \cdot S_{conx1} \cdot L_{conx1} \quad [kg] \quad (\text{III-57})$$

$$G_{conx1} = 1,067 Kg$$

$$P_{conx1} = 8,11W$$

$$P_{cclt} = 680024W$$

### III.2.5. Pertes dans la cuve

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{cuv} = 10.K.S_n \quad [W] \quad (III-58)$$

$S_n$  : Puissance apparente du transformateur.

$K$  : Facteur tenant compte des pertes dans la cuve, il est donné en fonction de la puissance apparente du transformateur. Sa valeur est donnée par le tableau suivant :

Puissance $S_n$ [kVA]	$\leq 1000$	1000-4000	6300-10000	16000-25000	40000- 63000
$K$	0,01-0,015	0,02-0,03	0,03-0,04	0,04-0,05	0,06-0 07

**Tableau III-2 : Facteur tenant compte des pertes dans la cuve  $K$  en fonction de la puissance.**

Dans notre cas  $K$  est compris entre  $[0,02 - 0,03]$ .

$$P_{cuv} = 375W$$

### III.2.6. Pertes joules totales

On calculera les pertes joules totales pour chaque paire d'enroulement.

#### III.2.6.1. Pertes joules totales entre les enroulements primaire et tertiaire

$$P_{cc13} = P_{cc1t} + P_{cc3t} + P_{cuv} \quad [W] \quad (III-59)$$

$$P_{cc13} = 1086576W$$

#### III.2.6.2. Pertes joules totales entre les enroulements primaire et secondaire

$$P_{cc12} = P_{cc1t} + P_{cc2t} + P_{cuv} \quad [W] \quad (III-60)$$

$$P_{cc12} = 1344392W$$

Après avoir calculé les pertes joules pour chaque paire d'enroulements, on prendra la valeur maximale. Cette valeur sera prise comme valeur des pertes joules du transformateur.

$$P_{ccmax} = 1344392W$$

- **Erreur relative sur les pertes :**

$$\frac{\Delta P_{cc}}{P_{cc}} = \frac{|P_{cc} - P_{ccmax}|}{P_{cc}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (III-61)$$

Avec :  $P_{cc}$  : Pertes en charge, elles sont données par le cahier des charges.

$P_{cc\max}$  : Valeur maximale des pertes joules pour chaque paire d'enroulements.

Cette erreur ne doit pas dépasser 15%, dans le cas contraire, on choisit d'autres valeurs des dimensions des conducteurs des enroulements, si non on recalcule le diamètre de la colonne.

$$\frac{\Delta P_{cc}}{P_{cc}} = 3,97\%$$

### III.2.7. Tensions de court circuit

On calcule la tension de court circuit entre chaque paire d'enroulements.

- **Tension de court circuit entre les enroulements primaire et secondaire :**

La tension de court circuit est donnée par la relation :

$$U_{cc12} = \sqrt{U_{cca12}^2 + U_{ccr12}^2} \quad [\%] \quad (\text{III-62})$$

$U_{cca12}$  : Tension de court circuit active entre l'enroulement primaire et secondaire, elle est donnée par la relation suivante :

$$U_{cca12} = \frac{P'_{cc12}}{S_n} 100 \quad [\%] \quad (\text{III-63})$$

$P'_{cc12}$  : Pertes en court circuit dans la paire d'enroulements primaire-secondaire.

$$U_{cca12} = 0,9\%$$

$$U_{ccr12} = \frac{7,92 S_C f a_{r12} k_{R12} \beta_{12} 10^{-3}}{U_{SP}^2} = \frac{x_{cc12} K_{21} I_2}{V_1} \quad (\text{III-64})$$

$S_C$  : Puissance apparente nominale par colonne.

$$a_{r12} = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}$$

$$K_{R12} = 1 - [(a_1 + a_{12} + a_2) / \pi H_B] \text{ et}$$

$$\beta_{12} = \pi D_{12} / H_B$$

$$D_{12} = D_2 + [(a_1 + a_{12} + a_2) / 2]$$

$$U_{ccr12} = 12,95\%$$

$$U_{cc12} = 12,97\%$$

$$\frac{\Delta U_{cc12}}{U_{cc12}} = \frac{|U_{cc12} - U_{ccr12}|}{U_{cc12}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (\text{III-65})$$

$$\frac{\Delta U_{cc12}}{U_{cc12}} = 7,8\%$$

- **Tension de court circuit entre les enroulements primaire et tertiaire:**

La tension de court circuit est donnée par la relation :

$$U_{cc13} = \sqrt{U_{cca13}^2 + U_{ccr13}^2} \quad [\%] \quad (\text{III-66})$$

$U_{cca13}$  : Tension de court circuit active entre l'enroulement primaire et tertiaire, elle est donnée par la relation suivante :

$$U_{cca13} = \frac{P'_{cc12=3}}{S_n} 100 \quad [\%] \quad (\text{III-67})$$

$P'_{cc13}$  : Pertes en court circuit dans la paire d'enroulements primaire-tertiaire.

$$U_{cca13} = 0,80\%$$

$$U_{ccr13} = \frac{7,92 S_C f a_{r13} k_{R13} \beta_{13} 10^{-3}}{U_{SP}^2} = \frac{x_{cc13} K_{31} I_3}{V_1} \quad (\text{III-68})$$

$$a_{r13} = a_{13} + \frac{a_1 + a_3}{3}$$

$$K_{R13} = 1 - [(a_1 + a_{13} + a_3) / \pi H_B] \text{ et}$$

$$\beta_{13} = \pi D_{13} / H_B$$

$$D_{13} = D_3 + [(a_1 + a_{13} + a_3) / 2]$$

$$U_{ccr13} = 19,03\%$$

$$U_{cc13} = 19,05\%$$

- **Tension de court circuit entre les enroulements secondaire et tertiaire:**

La tension de court circuit est donnée par la relation :

$$U_{cc13} = \sqrt{U_{cca13}^2 + U_{ccr13}^2} \quad [\%] \quad (\text{III-69})$$

$U_{cca13}$  : Tension de court circuit active entre l'enroulement secondaire et tertiaire, elle est donnée par la relation suivante :

$$U_{cca23} = \frac{P'_{cc23}}{S_n} 100 \quad [\%] \quad (\text{III-70})$$

$P'_{cc23}$  : Pertes en court circuit dans la paire d'enroulements secondaire-tertiaire.

$$\cdot U_{cca23} = 0,69\%$$

$$U_{ccr23} = \frac{7,92 S_C f a_{r23} k_{R23} \beta_{23} 10^{-3}}{U_{SP}^2} = \frac{x_{cc23} K_{32} I_3}{V_2} \quad (\text{III-71})$$

$$a_{r23} = a_{23} + \frac{a_2 + a_3}{3}$$

$$K_{R23} = 1 - [(a_2 + a_{23} + a_3) / \pi H_B] \text{ et}$$

$$\beta_{23} = \pi D_{23} / H_B$$

$$D_{23} = D_3 + [(a_2 + a_{23} + a_3) / 2]$$

D'où

$$U_{ccr23} = 5,52\%$$

$$U_{cc23} = 5,86\%$$

### III.3. Chutes de tension [1]

**-Chute de tension secondaire :**

$$\begin{aligned} \frac{V_1 - V_{r2}}{V_1} 100 &= \frac{r_{cc12} I_{r2} 100}{V_1} \cos \varphi_2 + \frac{x_{cc12} I_{r2} 100}{V_1} \sin \varphi_3 + \frac{r_1 I_{r3} 100}{3 V_1} \cos \varphi_3 + \frac{x_1 I_{r3} 100}{3 V_1} \sin \varphi_3 \\ &+ \frac{1}{200} \left( \frac{x_{cc12} I_{r2} 100}{V_1} \cos \varphi_3 - \frac{r_{cc12} I_{r2} 100}{V_1} \sin \varphi_2 + \frac{x_1 I_{r3} 100}{3 V_1} \cos \varphi_3 - \frac{r_1 I_{r3} 100}{3 V_1} \sin \varphi_3 \right)^2 \end{aligned}$$

**-Chute de tension tertiaire :**

$$\begin{aligned} \frac{V_1 - V_{r3}}{V_1} 100 &= \frac{r_{cc13} I_{r3} 100}{V_1} \cos \varphi_3 + \frac{x_{cc13} I_{r3} 100}{V_1} \sin \varphi_3 + \frac{r_1 I_{r2} 100}{3 V_1} \cos \varphi_2 + \frac{x_1 I_{r2} 100}{3 V_1} \sin \varphi_2 \\ &+ \frac{1}{200} \left( \frac{x_{cc13} I_{r3} 100}{V_1} \cos \varphi_2 - \frac{r_{cc13} I_{r3} 100}{V_1} \sin \varphi_3 + \frac{x_1 I_{r2} 100}{3 V_1} \cos \varphi_2 - \frac{r_1 I_{r2} 100}{3 V_1} \sin \varphi_2 \right)^2 \end{aligned}$$

Dans les expressions des chutes de tension on néglige les derniers termes qui sont faibles devant les autres termes.

Les réactances de fuite sont calculées à partir des relations (III.64), (III.68) et (III.71) :

$$x_{CC12} = \frac{V_1 U_{ccr12}}{K_{21} I_2}$$

$$x_{CC13} = \frac{V_1 U_{ccr13}}{K_{31} I_3}$$

$$x_{CC23} = \frac{V_1 U_{ccr23}}{K_{32} I_3}$$

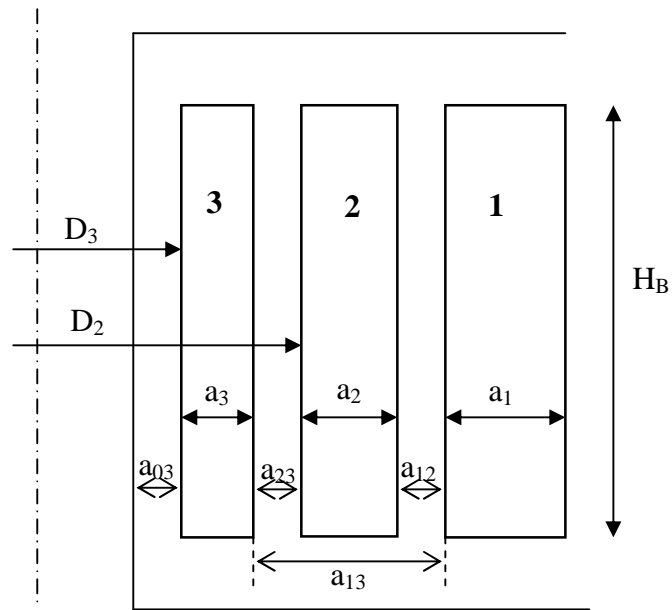
$$x_{CC12} = 95,32\Omega$$

$$x_{CC13} = 137,02\Omega$$

$$x_{CC23} = 0,022\Omega$$

$$x_1 = (x_{cc12} + x_{cc13} - x_{cc23})/2$$

$$x_1 = 116,16\Omega$$



- Pour une charge résistive on a :  $\cos \varphi = 1$

$$\Delta V_{I2} \% = \frac{V_1 - V_{r2}}{V_1} 100 = 2,51\%$$

$$\Delta V_{I3} \% = \frac{V_1 - V_{r3}}{V_1} 100 = 2,37\%$$

- Pour une charge inductive avec  $\cos \varphi = 0,8$

$$\Delta V_{I2} \% = \frac{V_1 - V_{r2}}{V_1} 100 = 19,45\%$$

$$\Delta V_{I3} \% = \frac{V_1 - V_{r3}}{V_1} 100 = 22,78\%$$

### III-4-Calcul du rendement [1]

$$\eta = 1 - \frac{P_{fer} + 3r_1 I_1^2 + 3r_2 I_2^2 + 3r_3 I_3^2}{P_2 + P_3 + P_{fer} + 3r_1 I_1^2 + 3r_2 I_2^2 + 3r_3 I_3^2} \quad [\%] \quad (\text{III-72})$$

$$\text{Avec : } P_2 = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi \quad P_3 = \sqrt{3} U_3 I_3 \cos \varphi$$

$$\Delta V_{12} \% = \Delta U_{12} \% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} 100 \quad (\text{III-73})$$

Soit

$$U_2 = U_{20} \left(1 - \frac{\Delta V_{12} \%}{100}\right) \quad (\text{III-74})$$

On a aussi

$$U_3 = U_{30} \left(1 - \frac{\Delta V_{13} \%}{100}\right) \quad (\text{III-75})$$

- **Pour une charge résistive on a :  $\cos \varphi = 1$**

$$U_2 = 672,68V$$

$$U_3 = 673,65V$$

$$\eta = 99,3\%$$

- **Pour une charge inductive :  $\cos \varphi = 0,8$**

$$U_2 = 555,8V$$

$$U_3 = 532,82V$$

$$\eta = 98,98\%$$

### III-5-Calcul du courant à vide [1]

Le courant à vide est le courant  $I_0$  absorbé au primaire alimenté sous sa tension nominale, le secondaire et le tertiaire du transformateur sont ouverts.

❖ Le courant  $I_0$  est donné par la forme suivante :

$$\frac{I_{10}}{I_{1n}} = \frac{G_{fer} \cdot P'_{0,1,5} \cdot K_{ks} \cdot K_{gs} \cdot K_{ws} \cdot K_{bs}}{S_n} \cdot 100 \quad [\%] \quad (\text{III-76})$$

$P'_{0,1,5} = 3,45W$  : pertes à vide sous une induction de crête de 1,5 T.

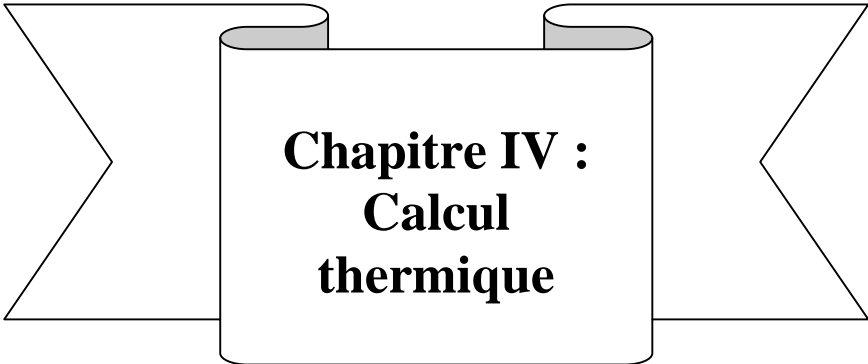
$K_{ks} = 1$  : facteur de forme du noyau, fonction du diamètre de la colonne ( $K_{ks} = 1$  pour les diamètres  $> 160$  mm).

$K_{gs}$  : Facteur de recuit, pour les tôles non recuit laminées à froid, il est égal à 1.

$K_{ws}$  : Facteur de forme de la bobine, pour les bobines circulaires concentriques, il est égal à 1.

$K_{Bs}$  : Facteur d'induction, qui est égal à 3,555.

$$\frac{I_{10}}{I_{1n}} = 1,25 \%$$



**Chapitre IV :  
Calcul  
thermique**

## Introduction

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

- Dans Le circuit magnétique : elles sont dues à la variation du flux alternatif dans les tôles magnétiques.
- Dans les enroulements : elles sont dues en grande partie à l'effet joule.

Ces pertes se dégagent dans le noyau et dans les enroulements, elles se transforment en énergie thermique et provoquent l'échauffement des parties correspondantes du transformateur.

La transmission de chaleur se fait selon trois formes : par conduction (cuivre, fer, isolants), par convection (liquides), par rayonnement (ondes électromagnétiques).

### Cas des transformateurs immergés avec isolation de classe A :

Les valeurs admissibles pour les échauffements du cuivre et de l'huile sont fixées par différentes normes. En ce qui nous concerne, nous limiterons notre examen à la norme CEI qui admet :

- Une température ambiante maximale  $40^{\circ}C$
- Une température ambiante moyenne journalière  $30^{\circ}C$
- Une température ambiante moyenne annuelle  $20^{\circ}C$

### Mode de refroidissement ONAN-ONAF :

- Echauffement de l'huile  $60^{\circ}C$
- Echauffement moyen du cuivre  $65^{\circ}C$
- Echauffement maximum du cuivre  $75^{\circ}C$

### Mode de refroidissement OFAF-ODAF/OFWF-ODWF :

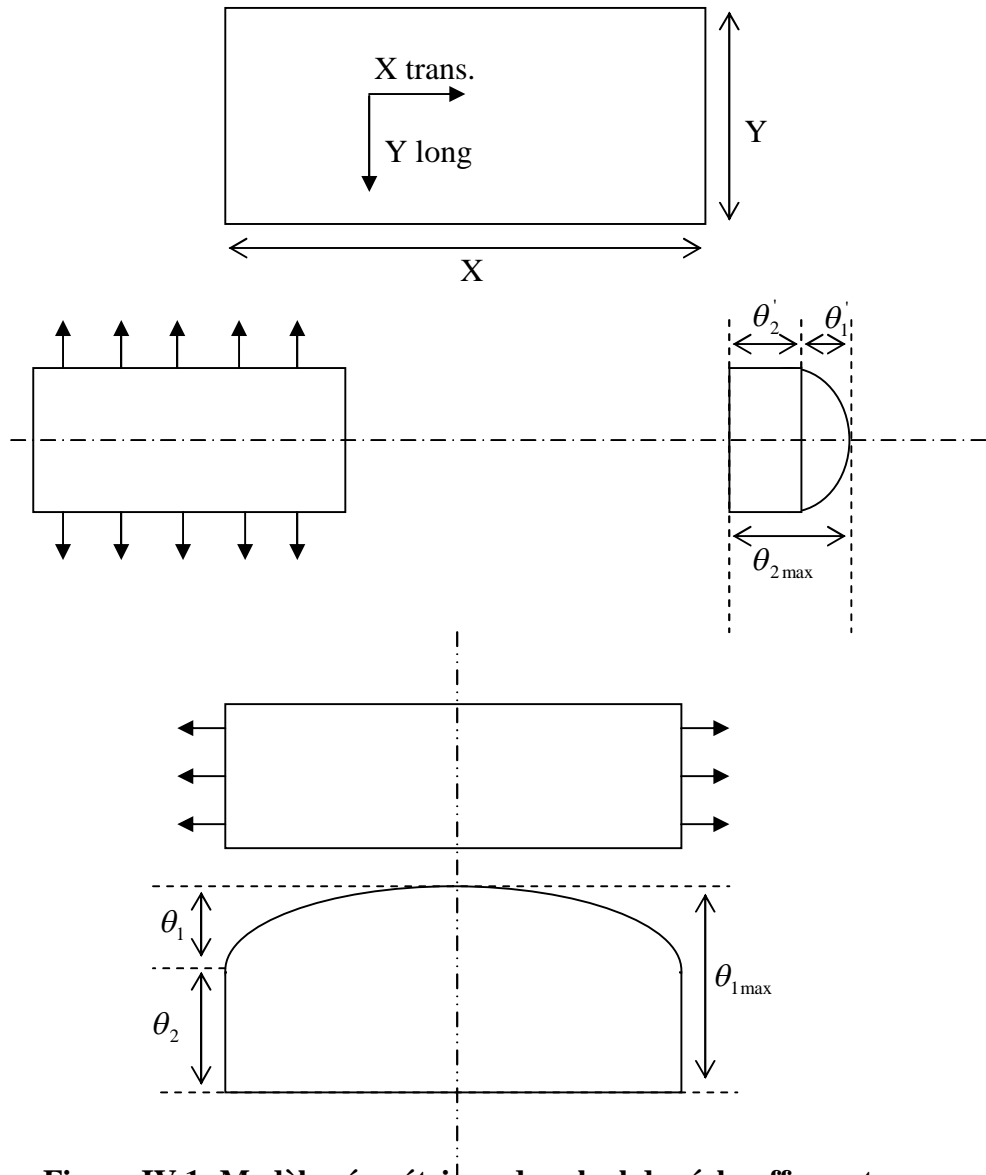
- Echauffement de l'huile  $60^{\circ}C$
- Echauffement moyen du fer  $70^{\circ}C$
- Echauffement max de cuivre  $75^{\circ}C$

## IV-1-Echauffement du circuit magnétique [4]

Un calcul simplifié consiste à assimiler la section de la colonne à un rectangle inscrit dans un même cercle, vu la non homogénéité du circuit magnétique et la différence des conditions de refroidissement des culasses et des colonnes. On aura alors une répartition uniforme des

perdes et un flux thermique qui se produit aussi bien longitudinalement et transversalement entre les couches des tôles du circuit magnétique.

Cette section est dimensionnée par la longueur X et la largeur Y comme le montre la figure IV-1.



**Figure IV.1: Modèle géométrique de calcul des échauffements.**

- Pour calculer la longueur du rectangle, on utilise la formule suivante :

$$X = 0,9.D_{fer} \quad [cm] \quad (IV-1)$$

$D_{fer}$  : Diamètre du fer (ou de la colonne) telle que :  $D_{fer} = 21,4 \text{ cm}$

$$X = 19,26 \text{ cm}$$

- Pour le calculer la largeur du rectangle, on utilise la formule suivante :

$$Y = \frac{S_{fer}}{X} \quad [cm] \quad (IV-2)$$

$S_{fer}$  : La section du fer (ou de la colonne).

$$Y = \frac{314,2}{19,26}$$

$$Y = 16,31 \text{ cm}$$

L'échauffement du circuit magnétique se fait par conduction et par convection dans les deux sens longitudinal et transversal.

#### IV-1-a-Echauffement dans le sens longitudinal

- Echauffement maximal par rapport à la surface dans le sens longitudinal par conduction  $\theta_1$  :

$$\theta_1 = \frac{P.X^2}{8\lambda_1} \quad [^{\circ}C] \quad (IV-3)$$

$P$  : Pertes spécifiques par unité de volume  $[W / m^3]$

$\lambda_1$  : Conductivité thermique longitudinale, il est égal à 20  $[W / m.^{\circ}C]$

$$\text{Avec : } P = P_{sp} \cdot \gamma_{fer} \quad [W / m^3] \quad (IV-4)$$

$P_{sp}$  : Pertes spécifiques des tôles par unité de masse en  $[W / Kg]$ .

$$\text{Et : } P_{sp} = \gamma_{1,5} \cdot K_{BP} \quad [W / Kg] \quad (IV-5)$$

$\gamma_{1,5}$  : Poids spécifique des tôles qui est égal à 0,97  $[Kg / m^3]$

$$P_{sp} = 1,02W / Kg$$

$$P = 7803W$$

$$\theta_1 = 1,80^{\circ}C$$

- Différence de température entre la surface du circuit magnétique et l'air dans le sens longitudinal par convection  $\theta_2$  :

$$\theta_2 = \frac{P.X}{2.\alpha_{conv}} \quad [^{\circ}C] \quad (IV-6)$$

$\alpha_{conv}$  : Coefficient de convection pour la surface verticale en  $[W / m.^{\circ}C]$ .

La valeur du coefficient de convection est choisie à partir de l'intervalle suivant :  $[100 - 110] W / m.^{\circ}C$ . On choisit  $\alpha_{con} = 110 W / m.^{\circ}C$  pour un papier baignant dans l'huile

$$\theta_2 = 6,83^{\circ}C$$

- Echauffement maximal dans le sens longitudinal :

$$\theta_{1\max} = \theta_1 + \theta_2 \quad [^{\circ}C] \quad (IV-7)$$

$$\theta_{1\max} = 8,63^{\circ}C$$

#### IV-1-b-Echauffement dans le sens transversal

- ❖ Echauffement maximal par rapport à la surface dans le sens transversal par conduction

$\theta_1'$  :

$$\theta_1' = \frac{P.Y^2}{8.\lambda_t} \quad [^{\circ}C] \quad (IV-8)$$

$\lambda_t$  : Conductivité thermique transversale qui est égal à  $3 [W / m^{\circ}C]$ .

$$\theta_1' = 8,64^{\circ}C$$

- ❖ Différence de température entre la surface du circuit magnétique et l'air dans le sens transversal par convection  $\theta_2'$  :

$$\theta_2' = \frac{P.Y}{2.\alpha_{con}} \quad [^{\circ}C] \quad (IV-9)$$

On choisit  $\alpha_{con} = 100 W / m^{\circ}C$  pour un papier baignant dans l'huile

$$\theta_2' = 6,36^{\circ}C$$

- ❖ Echauffement maximal dans le sens transversal  $\theta_{2\max}$  :

$$\theta_{2\max} = \theta_1' + \theta_2' \quad [^{\circ}C] \quad (IV-10)$$

$$\theta_{2\max} = 15^{\circ}C$$

#### IV-1-c-Echauffement résultant maximal du circuit magnétique par rapport à l'huile

$$\theta_{\max \text{ cm/H}} = \theta_{2\max} \frac{(\theta_2' + 1,5\theta_1')}{\theta_{2\max} + \theta_2' + 1,5\theta_1'} \quad [^{\circ}C] \quad (IV-11)$$

$$\theta_{\max \text{ cm/H}} = 8,44^{\circ}C$$

#### IV-2-Echauffement des enroulements [8]

La répartition de la température diffère suivant la hauteur et la largeur des enroulements. Pour cela on introduit une surélévation moyenne de température de l'enroulement par rapport à l'huile.

### IV-2-1-Echauffement moyen de l'enroulement tertiaire par rapport à l'huile

Pour la détermination de celui-ci, il faut d'abord déterminer :

- Le nombre de cales et leurs dimensions. Afin d'améliorer le refroidissement des parties actives du transformateur, on dispose de cales que l'on pose directement entre le support et le bobinage, constituant entre elles des canaux de circulation d'huile.
- Le nombre des cales est donné en fonction du diamètre extérieure du bobinage.

#### IV-2-1-a-dimètre intérieur de l'enroulement tertiaire $D_{int3}$

$$D_{int3} = D_{fer} + 2.a_{03} \quad [cm] \quad (IV-12)$$

$$D_{int3} = 21,4 + 2.0,5 \quad D_{int3} = 22,4cm$$

#### IV-2-1-b-Diamètre extérieur de l'enroulement tertiaire $D_{ext3}$

$$D_{ext3} = D_{int3} + 2.a_3 \quad [cm] \quad (IV-13)$$

$$D_{ext3} = 29,44cm$$

Pour trouver le nombre de cales, il faut le choisir à partir du tableau ci-dessous en fonction du diamètre extérieur de l'enroulement :

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

**Tableau IV-1 : Nombre de cales en fonction du diamètre extérieur.**

D'après le tableau, le nombre de cales est:  $N_{cal} = 8$

#### IV-2-1-c-Calcul de la surface intérieure de l'enroulement en contact avec l'huile

La surface intérieure en contact avec l'huile se calcule avec le produit suivant :  $S_{int3} \cdot K_{int3}$

➤ Calcul de la surface intérieure de l'enroulement :

$$S_{int3} = \pi \cdot D_{int3} \cdot h_{B3} \quad [cm^2] \quad (IV-14)$$

$$S_{int3} = 4859,51 \text{ cm}^2$$

$$S_{int3} = 4859,51 \text{ cm}^2$$

- Calcul du coefficient qui tient compte de la surface de l'enroulement occupée par les cales :

$$K_{int3} = \frac{\pi \cdot D_{int3} - N_{cal} \cdot L_{cal}}{\pi \cdot D_{int3}} \quad (IV-15)$$

$L_{cal}$  : largeur de la cale, égale à 0,5 cm .

$$K_{int3} = 0,94$$

D'où la surface en contact avec l'huile :

$$S_{int3} \cdot K_{int3} = 4567,93 \text{ cm}^2$$

#### IV-2-1-d-Calcul de la surface extérieure de l'enroulement en contact avec l'huile :

La surface extérieure en contact avec l'huile se calcule avec le produit suivant :  $S_{ext3} \cdot K_{ext3}$

- Calcul de la surface extérieure de l'enroulement :

$$S_{ext3} = \pi \cdot D_{ext3} \cdot h_{B3} \quad [cm^2] \quad (IV-16)$$

$$S_{ext3} = 6378,11 cm^2$$

- Calcul du coefficient qui tient compte de la surface de l'enroulement occupée par les cales :

$$K_{ext3} = \frac{\pi \cdot D_{ext3} - N_{cal} \cdot L_{cal}}{\pi \cdot D_{ext3}} \quad (IV-17)$$

$$K_{ext3} = 0,95$$

D'où la surface en contact avec l'huile :

$$S_{ext3} \cdot K_{ext3} = 6059,20 cm^2$$

#### IV-2-1-e-Calcul de la conductivité résultante de l'enroulement

$$\lambda_{res} = \frac{\lambda_p \cdot L}{2 \cdot L_p [m-1]} \quad [W / m^0 C] \quad (IV-18)$$

$\lambda_p$  : Conductivité thermique du papier, il est égale à 0,2 W / m<sup>0</sup> C .

$2L_p$  : Epaisseur de l'isolation.  $2L_p = 0,45 mm$

$r$  : Epaisseur de l'isolation entre couches.

$$L = a_3 - 2L_p = 34,75 mm$$

$m$  : Nombre de couche de la bobine.

$$\lambda_{res} = 5,14 W / m^0 C$$

#### IV-2-1-f-Calcul des résistances thermiques de l'isolation périphérique

- Côté intérieur de la bobine :

$$R_{\text{int}3} = \frac{L_p}{\lambda_p \cdot S_{\text{int}3}} + \frac{1}{\alpha_{\text{con}} \cdot S_{\text{int}3}} \quad [W^{-1} \circ C] \quad (\text{IV-19})$$

$$R_{\text{int}3} = 0,02 W^{-1} \circ C$$

- Côté extérieur de la bobine :

$$R_{\text{ext}3} = \frac{L_p}{\lambda_v \cdot S_{\text{ext}3}} + \frac{1}{\alpha_{\text{con}} \cdot S_{\text{ext}3}} \quad [W^{-1} \circ C] \quad (\text{IV-20})$$

$$R_{\text{ext}3} = 0,015 W^{-1} \circ C$$

#### IV-2-1-g-Calcul de la distance où la température est maximale

$$X = L \cdot \frac{R_{\text{ext}3} \cdot S_{\text{ext}3} + \frac{L}{2 \cdot \lambda_{\text{res}}}}{R_{\text{int}3} \cdot S_{\text{int}3} + R_{\text{ext}3} \cdot S_{\text{ext}3} + \frac{L}{\lambda_{\text{res}}}} \quad (\text{IV-21})$$

$L = a_3$  : Voir la figure

$$X = 0,017 m$$

D'où :  $L - X = 0,017 m$

#### IV-2-1-h-Calcul des flux thermiques

Calcul du rapport des flux  $i$  :

$$i = \frac{P_{\text{ext}3}}{P_{\text{int}3}} = \frac{(L - X) \cdot S_{\text{ext}3}}{X \cdot S_{\text{int}3}} \quad (\text{IV-22})$$

$$i = 1,31$$

$P_{\text{int}3}$  : Flux thermique qui traverse la surface  $S_{\text{int}3} \cdot K_{\text{int}3}$ .

$P_{\text{ext}3}$  : Flux thermique qui traverse la surface  $S_{\text{ext}3} \cdot K_{\text{ext}3}$ .

$$\text{On a : } P_{\text{ext}3} = \frac{P_{\text{cu}}}{1 + \frac{1}{i}} \quad [W] \quad (\text{IV-23})$$

$P_{\text{cc}3t}$  : Pertes Joules dans l'enroulement tertiaire.

$$\text{Avec : } P_{\text{cu}} = \frac{P_{\text{cc}3t}}{3} \quad [W] \quad (\text{IV-24})$$

$$P_{cu} = 1230,17W$$

$P_{cu}$  : Les pertes joules dans la bobine.

$$P_{ext3} = 698,96W$$

$$P_{int3} = \frac{P_{cu}}{1+i} \quad [W] \quad (IV-25)$$

$$P_{int3} = 532,54W$$

#### IV-2-1-i-Calcul des résistances internes

$$R_{iint3} = \frac{X}{2 \cdot \lambda_{res} \cdot S_{int3} \cdot K_{int3}} \quad [W^{-1}C] \quad (IV-26)$$

$$R_{iint3} = 0,0036W^{-1}C$$

$$R_{iext3} = \frac{(L-X)}{2 \cdot \lambda_{res} \cdot R_{ext3} \cdot K_{ext3}} \quad [W^{-1}C] \quad (IV-27)$$

$$R_{iext3} = 0,0027W^{-1}C$$

#### IV-2-1-j-Calcul de la température maximale de l'enroulement

$$\theta_{max3} = P_{ext3}(R_{ext3} + R_{iext3}) \quad [^{\circ}C] \quad (IV-28)$$

$$\theta_{max3} = 12,37^{\circ}C$$

$$\theta'_{max3} = P_{int3}(R_{int3} + R_{iint3}) \quad [^{\circ}C] \quad (IV-29)$$

$$\theta'_{max3} = 12,56^{\circ}C$$

#### IV-2-1-k-Calcul de $\theta_{ext3}$ et $\theta_{int3}$

➤ Côté extérieur :

$$\theta_{ext3} = P_{ext3} \cdot R_{iext3} \quad [^{\circ}C] \quad (IV-30)$$

$$\theta_{ext3} = 1,88^{\circ}C$$

➤ Côté intérieur :

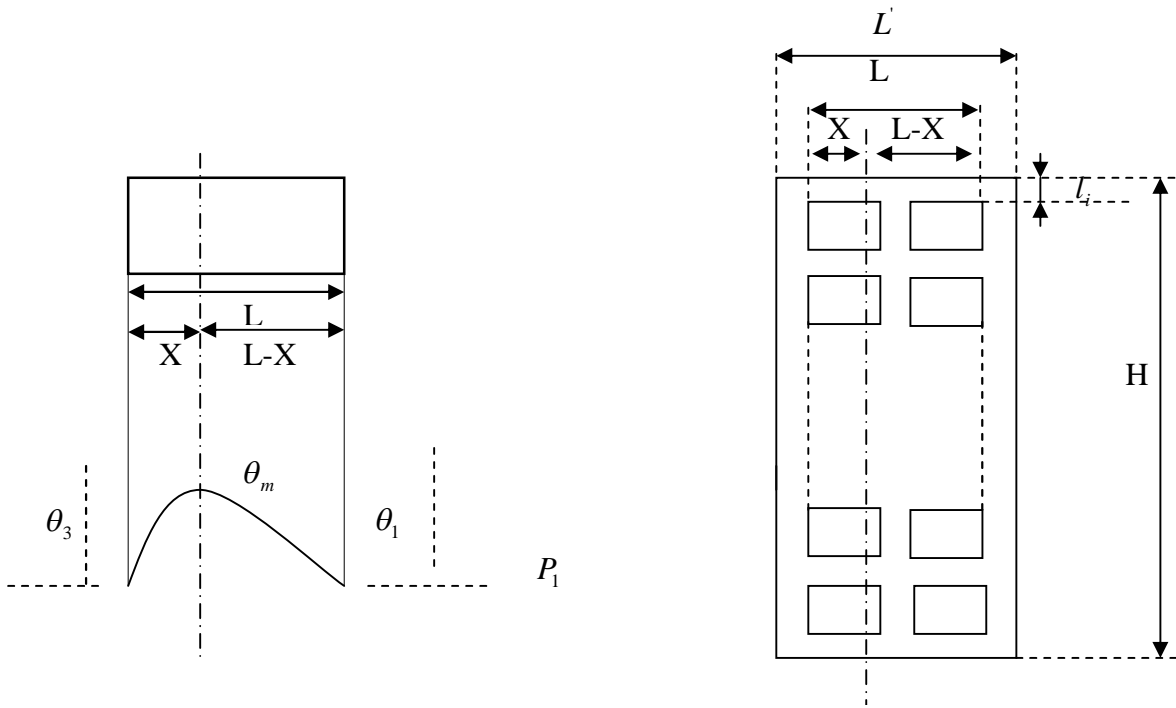
$$\theta_{int3} = P_{int3} \cdot R_{iint3} \quad [^{\circ}C] \quad (IV-31)$$

$$\theta_{int3} = 1,91^{\circ}C$$

D'où la température moyenne de l'enroulement tertiaire par rapport à l'huile est :

$$\theta_{moy3/H} = \theta_{max3} - \frac{i \cdot \theta_{ext3} + \theta_{int3}}{3(i+1)} \quad [^{\circ}C] \quad (IV-32)$$

$$\theta_{moy3/H} = 11,74^{\circ}C$$



**Figure IV-4 : Echauffement moyen de l'enroulement et sa configuration géométrique.**

#### IV-2-2-Echauffement moyen de l'enroulement secondaire par rapport à l'huile

##### IV-2-2-a-Calcul du diamètre intérieur

$$D_{int2} = D_{ext3} + 2a_{23} \quad [cm] \quad (IV-3)$$

$D_{int2}$  :Diamètre intérieur de l'enroulement secondaire.

$$D_{int2} = 33cm$$

##### IV-2-2-b-Calcul du diamètre extérieur

$$D_{ext2} = D_{int2} + 2a_2 \quad [cm] \quad (IV-34)$$

$D_{ext2}$  :Diamètre extérieur de l'enroulement secondaire.

$$D_{ext2} = 41,16cm$$

Le nombre de cales est choisie à par tir du tableau IV-1, donc  $N_{cal} = 10$ .

#### IV-2-2-c-Calcul de la surface intérieure de l'enroulement en contact avec l'huile

Elle se calcule par le produit suivant :  $S_{int2} \cdot K_{int2}$ .

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

$$S_{int2} = \pi \cdot D_{int2} \cdot h_{B2} \quad [cm^2] \quad (IV-35)$$

$$S_{int2} = 6288,69cm^2$$

- Calcul du coefficient qui tient compte de la surface de l'enroulement occupée par les cales :

$$K_{int2} = \frac{\pi \cdot D_{int2} - N_{cal} L_{cal}}{\pi \cdot D_{int2}} \quad (IV-36)$$

$$K_{int2} = 0,95$$

D'où la surface en contact avec l'huile :

$$S_{int2} \cdot K_{int2} = 5974,25cm^2$$

#### IV-2-2-d-Calcul de la surface extérieure de l'enroulement en contact avec l'huile

Elle est calculée par le produit suivant :  $S_{ext2} \cdot K_{ext2}$ .

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

$$S_{ext2} = \pi \cdot D_{ext2} \cdot h_{B2} \quad [cm^2] \quad (IV-37)$$

$$S_{ext2} = 7843,72cm^2$$

- Calcul du coefficient qui tient compte de la surface extérieure de l'enroulement occupée par les cales :

$$K_{ext2} = \frac{\pi \cdot D_{ext2} - N_{cal} L_{cal}}{\pi \cdot D_{ext2}} \quad (IV-38)$$

$$K_{ext2} = 0,96$$

La surface en contact avec l'huile est de :

$$S_{ext2} \cdot K_{ext2} = 7529,97cm^2$$

#### IV-2-2-e-Calcul de la conductivité résultante de l'enroulement :

$$\lambda_{res} = \frac{\lambda_p \cdot L}{2L_p(m-1)} \quad [W/m^{\circ}C] \quad (IV-39)$$

$$L = a_2 - 2 \cdot L_p = 40,35mm$$

$$\lambda_{res} = 5,97W/m^{\circ}C$$

#### IV-2-2-f-Calcul des résistances thermiques de l'isolation périphérique

➤ Pour le côté intérieur de la bobine :

$$R_{\text{int}2} = \frac{L_p}{\lambda_p \cdot S_{\text{int}2}} + \frac{1}{\alpha_{\text{con}} \cdot S_{\text{int}2}} \quad [W^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}] \quad (\text{IV-40})$$

$$R_{\text{int}2} = 0,016 W^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

➤ Pour le côté extérieur de la bobine :

$$R_{\text{ext}2} = \frac{L_p}{\lambda_p \cdot S_{\text{ext}2}} + \frac{1}{\alpha_{\text{con}} \cdot S_{\text{ext}2}} \quad [W^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}] \quad (\text{IV-41})$$

$$R_{\text{ext}2} = 0,013 W^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

#### IV-2-2-g-Calcul de la distance où la température est maximale

$$X = L \cdot \frac{R_{\text{ext}2} \cdot S_{\text{ext}2} + \frac{L}{2 \cdot \lambda_{\text{res}}}}{R_{\text{int}2} \cdot S_{\text{int}2} + R_{\text{ext}2} \cdot S_{\text{ext}2} + \frac{L}{\lambda_{\text{res}}}} \quad [m] \quad (\text{IV-42})$$

$$X = 0,02m$$

D'où :  $L - X = 0,02m$

#### IV-2-2-h-Calcul des flux thermiques

Calcul du rapport des flux  $i$  :

$$i = \frac{P_{\text{ext}2}}{P_{\text{int}2}} = \frac{(L - X) \cdot S_{\text{ext}2}}{X \cdot S_{\text{int}2}} \quad (\text{IV-43})$$

$$i = 1,24$$

$P_{\text{int}2}$  : Flux thermique qui traverse la surface  $S_{\text{int}2} \cdot K_{\text{int}2}$  .

$P_{\text{ext}2}$  : Flux thermique qui traverse la surface  $S_{\text{ext}2} \cdot K_{\text{ext}2}$  .

$$\text{On a : } P_{\text{ext}2} = \frac{P_{\text{cu}}}{1 + \frac{1}{i}} \quad [W] \quad (\text{IV-44})$$

$$\text{Avec : } P_{\text{cu}} = \frac{P_{\text{cc}2t}}{3} \quad [W] \quad (\text{IV-45})$$

$$P_{\text{cu}} = 2089,56W$$

$P_{cc2t}$  : Pertes joules dans l'enroulement secondaire.

$P_{cu}$  : Pertes joules dans la bobine.

$$P_{int\ 2} = \frac{P_{cu}}{1+i} \quad P_{ext\ 2} = 1160,86W \quad (IV-46)$$

$$P_{int\ 2} = 932,83W$$

#### IV-2-2-i-Calcul des résistances internes

$$R_{i\ int\ 2} = \frac{X}{2 \cdot \lambda_{res} \cdot S_{int\ 2} \cdot K_{int\ 2}} \quad [W^{-1} \text{ } ^\circ C] \quad (IV-47)$$

$$R_{i\ int\ 2} = 0,0028W^{-1} \text{ } ^\circ C$$

$$R_{i\ ext\ 2} = \frac{(L-X)}{2 \cdot \lambda_{res} \cdot S_{ext\ 2} \cdot K_{ext\ 2}} \quad [W^{-1} \text{ } ^\circ C] \quad (IV-48)$$

$$R_{i\ ext\ 2} = 0,0022W^{-1} \text{ } ^\circ C$$

#### IV-2-2-j-Calcul de la température maximale de l'enroulement secondaire

$$\theta_{\max\ 2} = P_{ext\ 2} (R_{ext\ 2} + R_{i\ ext\ 2}) \quad [^\circ C] \quad (IV-49)$$

$$\theta_{\max\ 2} = 17,64^\circ C$$

$$\theta'_{\max\ 2} = P_{int\ 2} (R_{int\ 2} + R_{i\ int\ 2}) \quad [^\circ C] \quad (IV-50)$$

$$\theta'_{\max\ 2} = 17,53^\circ C$$

#### IV-2-2-k-Calcul de $\theta_{ext\ 2}$ et $\theta_{int\ 2}$

- Côté extérieur :

$$\theta_{ext\ 2} = P_{ext\ 2} \cdot R_{i\ ext\ 2} \quad [^\circ C] \quad (IV-51)$$

$$\theta_{ext\ 2} = 2,55^\circ C$$

- Côté intérieur :

$$\theta_{int\ 2} = P_{int\ 2} \cdot R_{i\ int\ 2} \quad [^\circ C] \quad (IV-52)$$

$$\theta_{\text{int } 2} = 2,61^{\circ}\text{C}$$

D'où la température moyenne de l'enroulement secondaire par rapport à l'huile est :

$$\theta_{\text{moy } 2/H} = \theta_{\text{max } 2} - \frac{i \cdot \theta_{\text{ext } 2} + \theta_{\text{int } 2}}{3(i+1)} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV-53})$$

$$\theta_{\text{moy } 2/H} = 16,79^{\circ}\text{C}$$

#### IV-2-3-Echauffement de l'enroulement primaire par rapport à l'huile

Pour les enroulements en galettes avec des canaux de refroidissement entre tous les éléments, les pertes dans un élément de volume de l'enroulement sont données par la formule suivante :

$$P_{el} = K \cdot J_{mr1}^2 \cdot l_1 \cdot e_1 \cdot n_{sg} \cdot \delta \cdot K_{\text{sup}1} 10^{-6} \quad [\text{W}] \quad (\text{IV-54})$$

$P_{el}$  : Pertes par unité de volume en  $[\text{W}]$ .

$K$  : Coefficient du cuivre.

$J_{mr1}$  : Densité moyenne du courant recalculée en  $\text{A} / \text{mm}^2$ .

$l_1$  : Largeur du conducteur en  $[\text{mm}]$ .

$e_1$  : Épaisseur du conducteur en  $[\text{mm}]$ .

$n_{sg}$  : Nombre de conducteurs par galette.

$\delta$  : Masse volumique du cuivre qui est égale à  $8,9 \text{ Kg}/\text{dm}^3$ .

$K_{1\text{sup}}$  : Coefficient tenant compte des pertes supplémentaires qui sont dues à l'effet de peau électrique.

$$P_{el} = 22,08\text{W}$$

#### IV-2-3-a-calcul de la surface d'un élément $S_{el}$

$$S_{el} = K_z 2(e_1' + l_1' \cdot n_{sg}) 10^{-4} \quad [\text{m}^2] \quad (\text{IV-55})$$

$K_z$  : Coefficient qui est égal à 0,75.

$e_1'$  : Épaisseur du conducteur avec isolation.

$l_1'$  : Largeur du conducteur avec isolation.

$$S_{el} = 1,34 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

#### IV-3-3-b-Calcul du flux thermique par élément $P_1$

$$P_1 = 1,07 \frac{J_{mr1} \cdot l_1 \cdot n_1 \cdot K_{sup1}}{K_z (e_1 + l_1 n_{sg})} \quad [W / mm^2] \quad (IV-56)$$

$$P_1 = 113,86W / mm^2$$

#### IV-3-3-c-Calcul de chute de température interne de l'enroulement primaire

$$\theta_{il} = \frac{P_1 \cdot I_{sp}}{\lambda_p} \cdot 10^{-4} \quad [^{\circ}C] \quad (IV-57)$$

$I_{sp}$  :Epaisseur de l'isolation, égal à 0,225 mm.

$$\theta_{il} = 0,012^{\circ}C$$

#### IV-3-3-d-Calcul de chute de température sur la surface de l'enroulement primaire

$$\theta_{s1} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot P_1^{0,6} \quad [^{\circ}C] \quad (IV-58)$$

$K_1$  : Coefficient tenant compte de la température sur la surface de l'enroulement, égal à 1.

$K_2$  : Coefficient qui prend en considération les difficultés de transfert de chaleur par convection de l'huile dans les canaux intérieurs des enroulements.

$K_3$  : coefficient qui prend en considération l'influence de la convection de l'huile par rapport à la hauteur des canaux horizontaux, sa valeur est donnée dans le tableau IV-2. Pour notre cas  $C/a_1=0,11$  donc :  $K_3 = 1$

$C/a_1$	0,07-0,08	0,08-0,09	0,11	0,11-0,12	0,13-0,14	0,15-0,19	0,2
$K_3$	1,1	1,05	1,0	0,95	0,90	0,85	0,80

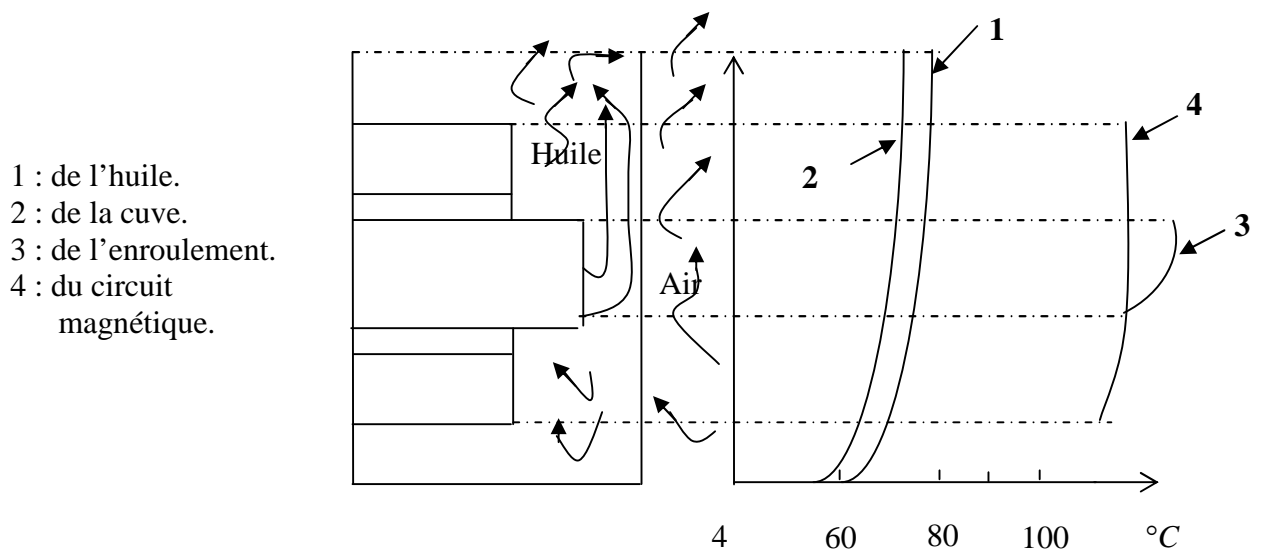
**Tableau IV-2 : Coefficient  $K_3$  .**

$$\theta_{s1} = 17,13^{\circ}C$$

#### IV-3-3-e-Calcul de la température moyenne de l'enroulement primaire par rapport à l'huile :

$$\theta_{moy1/h} = \theta_{il} + \theta_{s1} \quad [^{\circ}C] \quad (IV-59)$$

$$\theta_{moy1/h} = 17,14^{\circ}C$$



**Figure IV- 5: Variation de la température.**



**Chapitre V :**  
**Dimensionnement**  
**de la cuve**

## Introduction

Le dimensionnement de la cuve d'un transformateur est très important dans le calcul des transformateurs, puisqu'elle assure plusieurs fonctions à savoir : la protection de la partie active de tout risque extérieur, pollution, chaleur...

Le calcul de la cuve est étroitement lié au calcul thermique du transformateur, elle doit présenter une grande surface d'échange avec le milieu extérieur.

### V-1- Paramètres géométriques [4], [7]

#### V-1-1-Longueur de la cuve

$$L = 3 \cdot D_{ext1} + 2 \cdot a_{11} + 2 \cdot x \quad [mm] \quad (V-1)$$

$x$  : Distance d'isolation de l'enroulement par rapport à la cuve.

Pour  $U=30kV$  on prend  $x = 40mm$

$$L = 2024mm$$

#### V-1-2-Largeur de la cuve

$$L_c = D_{ext1} + 2 \cdot 40 \quad [mm] \quad (V-2)$$

$$L_c = 710mm$$

40mm est la distance d'isolation entre l'enroulement haute tension et la cuve, pour la série de 30kV.

#### V-1-3- Hauteur de la cuve

Voir la figure (V-1) :

$$H_c = H_n + H_{et} + 300 \quad [mm] \quad (V-3)$$

$$H_{et} = 32mm$$

$$H_c = 1486,9mm$$

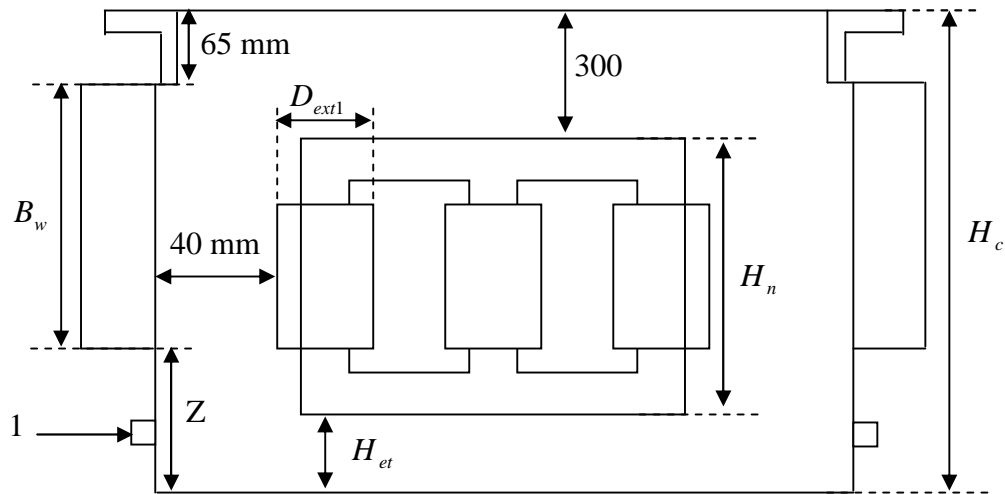
- Recalcule de  $z$

$$H_c = B_w + z + 65 \quad [mm] \quad (V-4)$$

$$\Rightarrow z = H_c - B_w - 65$$

$$z = 221,9mm$$

$z \geq 200mm$  Pour les grands transformateurs.



**Figure V-1 : La disposition de la partie active dans la cuve.**

**1** : Boulon de vidange.

$H_{et}$  : La hauteur des tôles d'embases.

300mm : espace pour les connexions.

$B_w$  : La hauteur des ondulations.

$H_n$  : La hauteur du noyau.

#### **V-1-4-dimensionnements des ondulations**

$B_w$  : Hauteur de l'ondulation.

Pour un meilleur dégagement de chaleur, il faut que les ondulations dépassent le niveau des bobines vers le bas.

D'après les calculs imposés par la cuve, on a fixé la hauteur des ondulations à 1200 mm tout le long des quatre faces de la cuve.

#### **- Température du cuivre :**

$\theta_{moy3/H} = 11,74 \text{ } ^\circ\text{C}$  : L'élévation moyenne de température du cuivre par apport à l'huile. Cotée tertiaire (basse tension).

$\theta_{moy2/H} = 16,79 \text{ } ^\circ\text{C}$  : L'élévation moyenne de température du cuivre par apport à l'huile.

Cotée secondaire (basse tension)

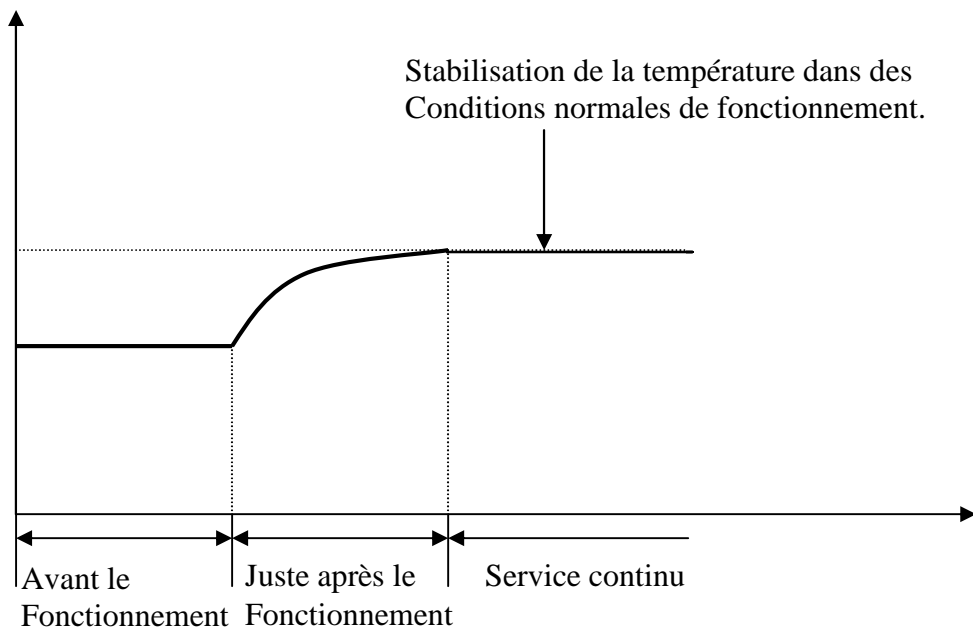
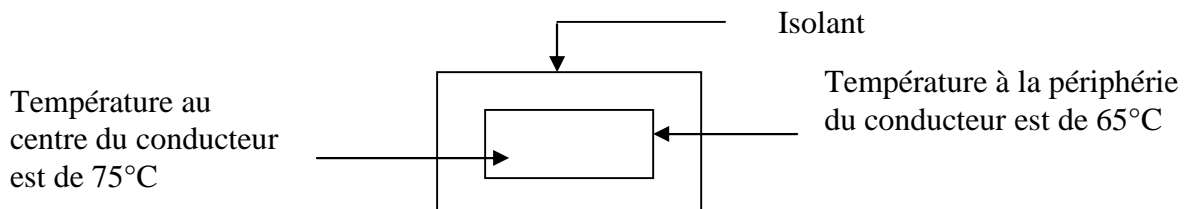
$\theta_{moy1/H} = 17,14^{\circ}\text{C}$  : : L'élévation moyenne de température du cuivre par apport à l'huile.

Cotée primaire (haute tension).

La température finale moyenne du cuivre par rapport à une température ambiante maximale de  $40^{\circ}\text{C}$  (standard) est de  $105^{\circ}\text{C}$  pour une isolation de classe A puisque les conducteurs sont isolés en papier immergé dans l'huile.

$\theta_{f\text{ moycui}} = 105^{\circ}\text{C}$  (Température finale moyenne du cuivre).

$\theta_{f\text{ max cui}} = 105 + 10 = 115^{\circ}\text{C}$  (Température finale maximale du cuivre).



**Figure V-2 : Courbe des différentes températures du conducteur en cuivre.**

- **Température de l'huile :**

Pour l'huile, il faut atteindre une élévation maximale de  $60^{\circ}\text{C}$  c'est-à-dire, une température finale de  $100^{\circ}\text{C}$ .

$$\theta_{\text{max huile}} = 60^{\circ}\text{C}$$

$$\theta_{mhuile} = 60^{\circ}\text{C} / 1,2 = 50^{\circ}\text{C}$$

- **Calcul de l'élévation moyenne de température de l'huile :**

➤ Coté tertiaire (basse tension) :

$$\theta_{3moyH} = \theta_{moycu} - \theta_{moy3/H} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{V-5})$$

$\theta_{moycu}$  : Température moyenne de la cuve.

$$\theta_{3moyH} = 53,26^{\circ}\text{C}$$

Coté secondaire (basse tension) :

$$\theta_{2moyH} = \theta_{moycu} - \theta_{moy2/H} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{V-6})$$

$$\theta_{2moyH} = 48,21^{\circ}\text{C}$$

➤ Coté primaire (haute tension) :

$$\theta_{1moyH} = \theta_{moycu} - \theta_{moy1/H} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{V-7})$$

$$\theta_{1moyH} = 47,86^{\circ}\text{C}$$

D'où les élévations maximales de température de l'huile cotés haute et basse tension :

$$\theta_{3\max H} = \theta_{3moyH} \cdot 1,2 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{V-8})$$

$$\theta_{3\max H} = 63,91^{\circ}\text{C}$$

$$\theta_{2\max H} = \theta_{2moyH} \cdot 1,2 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{V-9})$$

$$\theta_{2\max H} = 57,85^{\circ}\text{C}$$

$$\theta_{1\max H} = \theta_{1moyH} \cdot 1,2 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{V-10})$$

$$\theta_{1\max H} = 57,43^{\circ}\text{C}$$

Pour déterminer le nombre d'ondulations, on doit calculer les pertes à dissiper par la cuve au niveau des parties fonctionnelles, sa valeur est donnée par la formule suivante ;

$$P_{55} = (P_0 + 1,06 \cdot P_{cc}) \cdot m \quad [W] \quad (\text{V-11})$$

$P_{55}$  : Pertes à dissiper.

$m$  : Facteur de dissipation.

Comme il faut dimensionner une cuve qui va dissiper les pertes  $P_{55}$  et voir plus pour des raisons de sécurité et de durée de vie du transformateur, on prend une élévation de température maximale de l'huile  $\theta_{\max H} = 52^{\circ}\text{C}$ , donc une élévation moyenne de température d'huile

$$\theta_{\text{moyH}} = \theta_{\max H} / 1,2 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{V-12})$$

$$\theta_{\text{moyH}} = 43,33^{\circ}\text{C}$$

$$m = \left( \frac{55}{\theta_{\max H}} \right)^{\frac{1}{0,7}} \quad (\text{V-13})$$

$$m = 1,07$$

Pertes à dissiper :  $P_{55} = 18,179\text{KW}$

#### V-1-5- Détermination du nombre d'ondulations

$P_w$  : Pertes dissipées par ondulation, elles sont données par le tableau (V-2)

$L = 2024\text{mm} \Rightarrow$  On prend  $L=2025$  mm (longueur intérieur de la cuve)

$L_c = 710\text{mm} \Rightarrow$  On prend  $L_c = 710$  mm (largeur intérieur de la cuve)

- Coté longueur de la cuve (coté avant et arrière du transformateur) : figure V-3

$$L = n_1 \cdot 45 \cdot 2 \cdot e_{w1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{V-14})$$

$n_1$  : Nombre d'entre axes, coté longueur de la cuve.

$$N_1 = n_1 + 1$$

$N_1$  : Nombre d'ondulation cotée longueur de la cuve.

La valeur nominale de  $e_{w1} \geq 18$  mm.

On prend  $e_{w1} = 20$  mm.

$$n_1 = \frac{L - 2 \cdot e_{w1}}{45}$$

On prend  $n_1 = 44$

$$N_1 = 45$$

**-Correction de  $e_{w1}$  :**

$$e_{w1} = \frac{L - n_1 \cdot 45}{2} \quad [mm] \quad (V-15)$$

$$e_{w1} = 22,5mm$$

**-Coté largeur de la cuve :**

$$Lc = n_2 \cdot 45 + 2 \cdot e_{w2} \quad [mm] \quad (V-16)$$

$n_2$  : Nombre d'entre axes d'ondulations cotées largeur de la cuve

$$N_2 = n_2 + 1$$

$N_2$  : Nombre d'ondulations cotées largeur de la cuve

$$n_2 = \frac{Lc - 2 \cdot e_{w2}}{45}$$

On prend  $e_{w2} = 20$  mm

On prend  $n_2 = 14$

$$N_2 = 15$$

**-Correction de  $e_{w2}$  :**

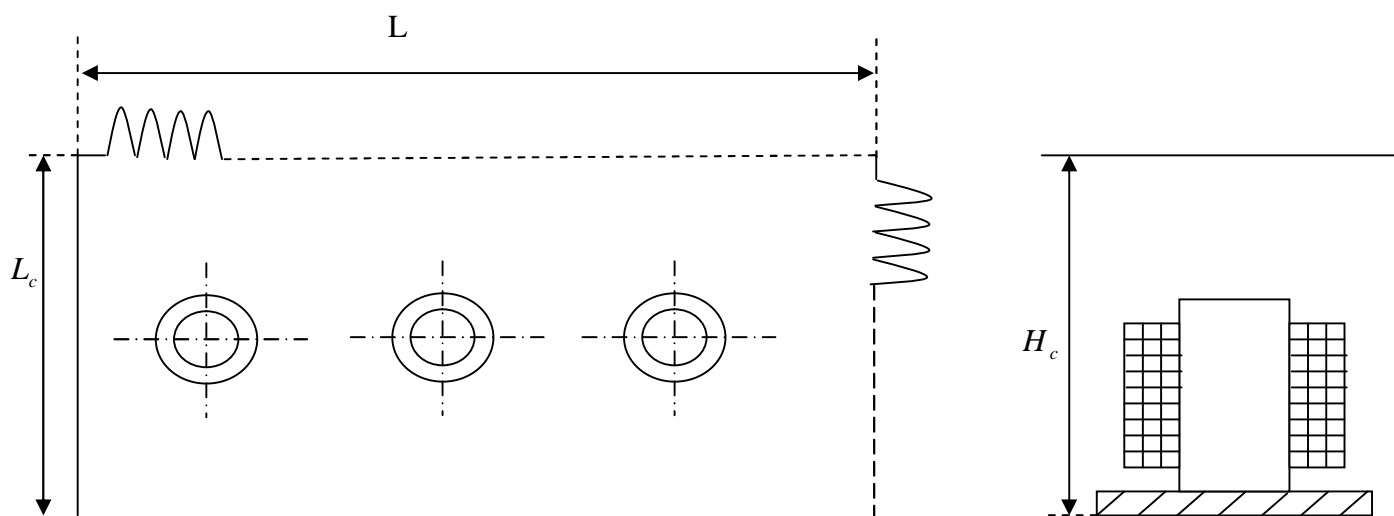
$$e_{w2} = \frac{Lc - n_2 \cdot 45}{2} \quad [mm] \quad (V-17)$$

$$e_{w2} = 40mm$$

Le nombre total d'ondulations est :

$$N = 2(N_1 + N_2)$$

$$N = 120$$



**Figure V-3 : Dimensionnement de la cuve.**

## **V-2- Pertes dissipées par la cuve et le couvercle [8]**

### **V-2-1- Pertes dissipées par la cuve**

#### **-Pour le côté longueur de la cuve :**

A partir du tableau (V-2), on choisit les dimensions suivantes des ondulations :

La profondeur d'ondulation :  $t_{w1} = 160$  mm.

La hauteur d'ondulation :  $B_w = 1200$  mm

Les pertes dissipées par ondulation :  $P_{w1} = 137$  W

Les pertes totales dissipées par toutes les ondulations sont :

$$P_{w1}' = 2 \cdot N_1 \cdot P_{w1} \quad [W] \quad (V-18)$$

$$P_{w1}' = 12330W$$

#### **-Côté largeur de la cuve :**

A partir du tableau on choisit les dimensions suivantes :

La profondeur d'ondulation :  $t_{w2} = 160$  mm.

La hauteur d'ondulation :  $B_w = 1200$  mm

Les pertes dissipées par ondulation :  $P_{w2} = 137 \text{ W}$

Les pertes totales dissipées par toutes les ondulations sont :

$$P_{w2}' = 2 \cdot N_2 \cdot P_{w2} \quad [W] \quad (V-19)$$

$$P_{w2}' = 4110W$$

**Remarque :**

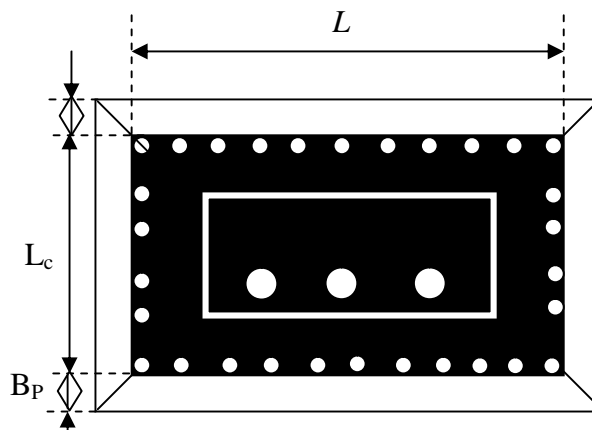
On admettra que les pertes dissipées par le bas du transformateur (le bassin) sont négligeables.

**V.2.2. Pertes dissipées par le couvercle**

$$P_c = 700 \cdot S \quad [W] \quad (V-20)$$

**-Calcul de la surface de dissipation :**

$$S = (L + 2B_p)(L_c + 2B_p) \quad [m^2] \quad (V-21)$$



**Figure V 4 : Le couvercle.**

La valeur de  $2B_p$  est donnée par le tableau (V-1)

$S_n (KVA)$	$\leq 250$	315 ÷ 1600
$2.B_p (m)$	0,09	0,13

**Tableau V-1 : Les valeurs de  $2B_p$  en fonction de la puissance apparente.**

$B_w (mm)$	$t_w (mm)$	50	100	125	160	200	250	280	320
500	$p_w (W)$	34	51	59	69	80	93		
	$G_w (Kg)$	0,71	1,2	1,45	1,80	2,26	2,66		
	$V_w (dm^3)$	0,19	0,39	0,49	0,63	0,79	1,00		
600	$p_w (W)$	40	59	68	79	92	108	116	127
	$G_w (Kg)$	0,84	1,43	1,73	2,61	2,64	3,20	3,55	4,02
	$V_w (dm^3)$	0,23	0,47	0,59	0,76	0,85	1,19	1,34	1,53
700	$p_w (W)$	45	67	76	90	104	122	131	143
	$G_w (Kg)$	0,98	1,66	2,01	2,49	3,04	3,72	4,14	4,68
	$V_w (dm^3)$	0,27	0,55	0,69	0,89	1,11	1,39	2,01	2,78
800	$p_w (W)$	50	74	85	99	115	134	145	159
	$G_w (Kg)$	1,11	1,90	2,29	2,84	3,74	4,25	4,72	5,35
	$V_w (dm^3)$	0,31	0,63	0,79	1,01	1,22	1,59	1,78	2,55
900	$p_w (W)$	55	81	93	109	126	147	159	174
	$G_w (Kg)$	1,24	2,13	2,57	3,14	3,87	4,78	5,31	6,01
	$V_w (dm^3)$	0,35	0,71	0,89	1,14	1,43	1,79	2,01	2,29
1000	$p_w (W)$	60	88	101	118	137	160	172	189
	$G_w (Kg)$	1,38	2,36	2,85	3,54	4,32	5,30	5,89	6,68
	$V_w (dm^3)$	0,39	0,79	0,99	1,27	1,59	1,99	2,23	2,25
1200	$p_w (W)$	70	102	118	137	148	160	187	204
	$G_w (Kg)$	1,66	2,85	3,45	4,28	5,23	6,41	7,13	8,08
	$V_w (dm^3)$	0,47	0,95	1,20	1,55	1,92	2,40	2,69	2,92

**Tableau V-2 : Caractéristiques des ondulations.**

On prend  $2B_p = 0,13 \text{ m}$

$$S = 1,81 \text{ m}^2$$

Résultat numérique des pertes dissipées par le couvercle

$$P_c = 1267W$$

P : Pertes dissipées par la cuve et le couvercle

$$P = P_{wc} + P_c \quad [W] \quad (V-22)$$

$$P_{wc} = P_{w1} + P_{w2} = 16440W \quad [W] \quad (V-23)$$

$$P = 17707W$$

Les pertes dissipées par la cuve et le couvercle sont supérieures aux pertes dissipées, ce qui garantit un bon fonctionnement de l'appareil.

### V-3- Echauffements dans le transformateur [4], [8]

#### V-3-1- Echauffement de l'huile par rapport à la cuve

Ils sont donnés par la relation suivante :

$$\theta_H / C = 0,165 \left[ \frac{1,05(P_0 + P_{cc})}{S_T} \right]^{0,6} \quad [^{\circ}C] \quad (V-24)$$

$$S_T = S_0 + S_w \quad [dm^2] \quad (V-25)$$

$S_T$  : Surface de la tôle en contact avec l'huile.

$S_0$  : Surface du couvercle en contact avec l'huile.

$S_w$  : Surface totale de la partie ondulée.

$$S_0 = L \cdot Lc \quad [dm^2] \quad (V-26)$$

$$S_0 = 143,77 dm^2$$

$$S_w = 2 \cdot [(t_{w1} - 4) \cdot 2 \cdot n_1 + n_1 \pi \cdot 4 + (n_1 - 1) \cdot (45 - 8) + (e_{w1} - 4) \cdot 2] \cdot B_w \\ + 2 \cdot [(t_{w2} - 4) \cdot 2 \cdot n_2 + n_2 \pi \cdot 4 + (n_2 - 1) \cdot (45 - 8) + (e_{w2} - 4) \cdot 2] \cdot B_w \quad [dm^2] \quad (V-27)$$

Où  $S_{w1}$  et  $S_{w2}$  sont respectivement les surfaces du côté longueur et du côté largeur du transformateur.

$$S_w = 4400,99 dm^2$$

$$S_T = 4544,76 dm^2$$

$$\theta_{H/C} = 5,76^{\circ}C$$

### V-3-2-Echauffement de la cuve par rapport à l'air

$$\theta_{c/a} = \frac{[1,05 \cdot (P_0 + P_{cc})]^{0,8}}{2,8 \cdot S_r + 2,5 \cdot S_T} \quad [^{\circ}C] \quad (V-28)$$

$S_r$  : Surface radiante de la cuve.

$$S_r = [(L + 2t_{w1}) + (Lc + 2t_{w2})] \cdot B_w + S_0 \quad [dm^2] \quad (V-29)$$

$$S_r = 537,73dm^2$$

$$\theta_{c/a} = 18,79^{\circ}C$$

### V-3-3-Température du circuit magnétique

$$\theta_{cm} = \theta_{\max cm/H} + \theta_{H/C} + \theta_{C/a} + T_a \quad [^{\circ}C] \quad (V-30)$$

$\theta_{cm}$  : Température du circuit magnétique.

$\theta_{\max cm/H}$  : Température du circuit magnétique par rapport à l'huile.

$\theta_{H/C}$  : Température de l'huile par rapport à la cuve.

$\theta_{C/a}$  : Température de la cuve par rapport à l'air.

$T_a$  : Température ambiante  $40^{\circ}C$ .

$$\theta_{cm} = 72,99^{\circ}C$$

### V-3-4- Température des enroulements :

- Enroulement tertiaire (basse tension)

$$\theta_{e3} = \theta_{m3/H} + \theta_{H/C} + \theta_{C/a} + T_a \quad [^{\circ}C] \quad (V-31)$$

$$\theta_{e3} = 76,29^{\circ}C$$

- Enroulement secondaire (basse tension)

$$\theta_{e2} = \theta_{m2/H} + \theta_{H/C} + \theta_{C/a} + T_a \quad [^{\circ}C] \quad (V-32)$$

$$\theta_{e2} = 81,34^{\circ}C$$

- Enroulement primaire (haute tension)

$$\theta_{e1} = \theta_{m1/H} + \theta_{H/C} + \theta_{C/a} + T_a \quad [^{\circ}C] \quad (V-33)$$

$$\theta_{e1} = 81,69^{\circ}C$$

### V-4- Volume de l'huile

#### V-4-1-Volume de la cuve sans ondulations

$$V_c = L \cdot L_c \cdot H_c \quad [dm^3] \quad (V-34)$$

$$V_c = 2137,79dm^3$$

#### V-4-2- Volume des ondulations

$$V_0 = V_{01} + V_{02} = 2N_1V_{w1} + 2N_2V_{w2} \quad [dm^3] \quad (V-35)$$

$V_0$  : Volume total des ondulations

$V_{01}$  : Volume total des ondulations pour le coté long de la cuve

$V_{w1}$  : Volume d'une ondulation pour une profondeur  $t_{w1} = 160mm$  (coté long)

D'après le tableau  $V_{w1} = 1,55dm^3$

$$V_{01} = 139,5dm^3$$

$V_{02}$  : Volume total des ondulations pour le côté large de la cuve.

$V_{w2}$  : Volume d'une ondulation pour une profondeur  $t_{w2} = 160mm$  (côté large).

$$V_{w2} = 1,55dm^3$$

$$V_{02} = 36,5dm^3$$

$$V_0 = 186dm^3$$

#### V-4-3-Volume de la partie décuvable

C'est le volume occupé par la partie active et les accessoires de fixations, serrages et isolateurs à l'intérieur de la cuve.

Le volume occupé par les accessoires de fixations, de serrages et isolateurs ( papier presspahn, et cales) est estimé à 20% du volume de la partie active.

$$V_d = 1,2.V_a \quad [dm^3] \quad (V-36)$$

$$V_a = \left( \frac{G_n}{\gamma_{fer}} + \frac{G_{cn}}{\delta} \right) \quad [dm^3] \quad (V-37)$$

$$V_a = 237,9dm^3$$

$$V_d = 285,48dm^3$$

$V_d$  : Volume de la partie décuvable.

$V_a$  : Volume de la partie active.

$G_n$  : Masse du noyau.

$G_{cn}$  : Masse des enroulements.

$\gamma_{fer}$  : Masse volumique de la tôle utilisée ( $7,65 \text{ kg} / \text{dm}^3$ ).

$\delta$  : Masse volumique du cuivre ( $8,9 \text{ kg} / \text{dm}^3$ ).

#### V-4-4- Volume de l'huile

$$V_H = V_c + V_0 - V_d \quad [\text{dm}^3] \quad (\text{V-38})$$

$$V_H = 2038,31 \text{dm}^3$$

L'échauffement de l'huile provoque une dilatation de celle-ci. Vu l'étanchéité de la cuve, si on met un volume d'huile égal à celui de la cuve, la dilatation de l'huile provoquera des forces de pressions sur les parois de la cuve. Pour cela, il faut calculer un volume à utiliser en prenant en considération la surélévation moyenne de la température d'huile.

$$\Delta\theta = \theta_{\text{moyH}} + 20 \quad [^\circ\text{C}] \quad (\text{V-39})$$

$$\theta_{\text{moyH}} = \frac{\theta_{\text{maxH}}}{1,2} \quad [^\circ\text{C}] \quad (\text{V-40})$$

$$\theta_{\text{moyH}} = 43,33^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta = 63,33^\circ\text{C}$$

Soit  $V_{ad}$  le volume de l'huile après dilatation, qui doit être égale au volume d'huile calculé.

$$V_{ad} = C.\Delta\theta.V + V \quad [\text{dm}^3] \quad (\text{V-41})$$

$$V = \frac{V_{ad}}{C.\Delta\theta + 1}$$

$$V = 1937,55 \text{dm}^3$$

$V$  : Volume de l'huile qu'il faut utiliser.

$C$  : Coefficient de dilatation ( $8,3.10^{-4}^\circ\text{C}$ )

Donc il faut prendre un volume d'huile,  $V = 1937,55 \text{dm}^3$  pour occuper juste le volume intérieur qu'il faut pour éviter les forces de pression.

#### V-5-Le poids du transformateur :

Le poids total du transformateur est la somme du poids de la cuve, de la partie décuvable et de l'huile.

##### V-5-1-Poids de la cuve

$$G_c = G_w + G_b + G_0 \quad [Kg] \quad (V-42)$$

$G_w$  : Poids de la partie ondulée.

$G_b$  : Poids du bassin.

$G_0$  : Poids du couvercle.

$$G_w = \gamma \cdot S_w \cdot E_w \quad [Kg] \quad (V-43)$$

$$G_w = 470,02Kg$$

$E_w$  : Epaisseur de la tôle des ondulations ( $E_w = 1,2mm$ )

$$G_b = [(L \cdot L_c \cdot E_b) + 2(L + L_c) \cdot E_b \cdot h_b] \gamma \quad [Kg] \quad (V-44)$$

$E_b$  : Epaisseur de la tôle du bassin et du couvercle, elle est égal à  $4mm$ .

On dimensionne la hauteur du bassin par rapport à la hauteur de la cuve.

$$h_b = H - (B_w - 10) - 45 \quad [mm] \quad (V-45)$$

$$h_b = 341mm$$

$h_b$  : Hauteur du bassin.

$(B_w - 10)$  : Hauteur de la paroi ondulée moins la hauteur de la surface soudée.

$45mm$ , Est la hauteur du cadre.

$$G_b = 35,66Kg$$

### V-5-2-Poids du couvercle

$$G_0 = \gamma_{fer} \cdot S \cdot E_b \quad [Kg] \quad (V46)$$

$$G_0 = 13,19Kg$$

$$G_c = 581,87Kg$$

### V-5-3-Poids de la partie décuvable

C'est le poids de la partie active, et les accessoires de montage et fixation qui sont estimés à 10% du poids de la partie active.

$$G_d = 1,1(G_n + G) \quad [Kg] \quad (V-47)$$

$G_d$  : Poids de la partie active.

$G_n$  : Poids du noyau.

$G$  : Poids des enroulements.

$$G_d = 2099,52Kg$$

#### V-5-4-Poids de l'huile

$$G_H = \gamma_H \cdot V \quad [Kg] \quad (V-48)$$

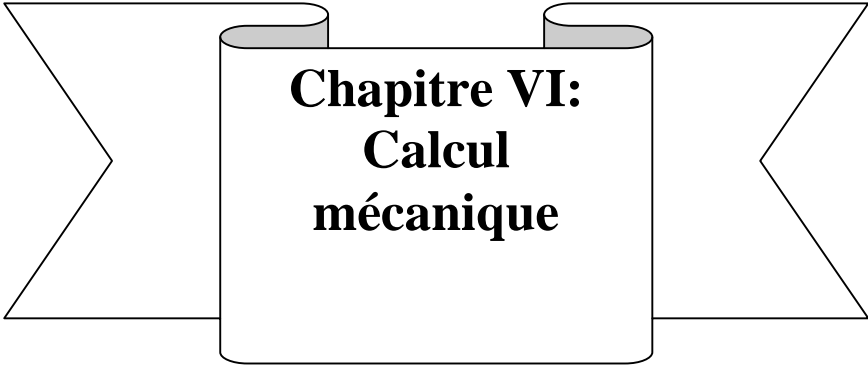
$\gamma_H$  : Masse volumique de l'huile utilisée ( $\gamma_H = 0,86Kg / dm^3$ ).

$$G_H = 1752,94Kg$$

#### V-5-5-Le poids total du transformateur :

$$G_T = G_c + G_d + G_H \quad [Kg] \quad (V-49)$$

$$G_T = 4371Kg$$



**Chapitre VI:  
Calcul  
mécanique**

## Introduction

La surintensité de court-circuit peut atteindre cinquante fois le courant nominal  $I_n$ , cela entraîne des efforts électrodynamiques importants entre les spires d'un enroulement et entre les enroulements. Ces efforts s'élèvent à des centaines de tonnes dans les très gros transformateurs.

Les forces de court-circuit peuvent être classées d'après la direction d'action entre les forces radiales et les forces axiales.

Le but de ce chapitre est de vérifier la résistance des bobinages aux efforts électrodynamiques axiaux et radiaux dus aux courants de court-circuit, et le dimensionnement des différents éléments de serrage (ferrures, boulons...etc.).

Pour calculer ces forces, on doit d'abord calculer les courants de court-circuit.

### VI-1- Intensité du courant de court-circuit [4]

Les enroulements sont soumis aux efforts électrodynamiques dans les deux sens, radial et axial. On détermine ces efforts pour le cas le plus défavorable de court-circuit.

Les efforts se produisent instantanément, il faut donc considérer la valeur maximale que peut atteindre l'intensité lors de la mise brutale en court-circuit.

#### VI.1-1- Calcul des valeurs maximales des courants de court-circuit

La valeur maximale du courant de court-circuit est donnée par :

$$I_{cc\max} = \sqrt{2}.K_m.I_{ccd} \quad [A] \quad (VI-1)$$

$I_{ccd}$  : Courant stationnaire de court-circuit.

$K_m$  : Coefficient de crête ou d'impulsion.

Le courant stationnaire de court-circuit est donné par :

$$I_{ccd} = I_n \cdot \frac{100}{U_{cc}} \quad [A] \quad (VI-2)$$

La valeur du coefficient de crête est donnée par :

$$K_m = 1 + e^{-\pi \frac{U_{cca12}}{U_{ccr12}}} \quad (VI-3)$$

➤ **Enroulement haute tension (primaire) :**

$$I_{cc1\max} = \sqrt{2}.K_m.I_{ccd1} \quad [A] \quad (VI-4)$$

Avec :

$$I_{ccd1} = I_1 \cdot \frac{100}{U_{ccr12}} \quad [A] \quad (VI-5)$$

Donc :

$$K_m = 1,75$$

$$I_{ccd1} = 111,57A$$

$$I_{cc1\max} = 276,12A$$

➤ **Enroulement basse tension (secondaire) :**

$$I_{cc2\max} = \sqrt{2} \cdot K_m \cdot I_{ccd2} \quad [A] \quad (VI-6)$$

$$I_{ccd2} = I_2 \cdot \frac{100}{U_{ccr12}} \quad [A] \quad (VI-7)$$

Valeurs numériques :

$$I_{ccd2} = 8407,39A$$

$$I_{cc2\max} = 20807,22A$$

➤ **Enroulement basse tension (tertiaire) :**

$$I_{cc3\max} = \sqrt{2} \cdot K_m \cdot I_{ccd3} \quad [A] \quad (VI-8)$$

$$I_{ccd3} = I_3 \cdot \frac{100}{U_{ccr12}} \quad [A] \quad (VI-9)$$

Grandeurs numériques :

$$I_{ccd3} = 4854,18A$$

$$I_{cc3\max} = 12013,48A$$

## VI-1-2-Efforts électrodynamiques

### VI-1-2-1- Efforts radiaux

Ils exercent une compression sur l'enroulement primaire et une traction sur l'enroulement secondaire telle que :

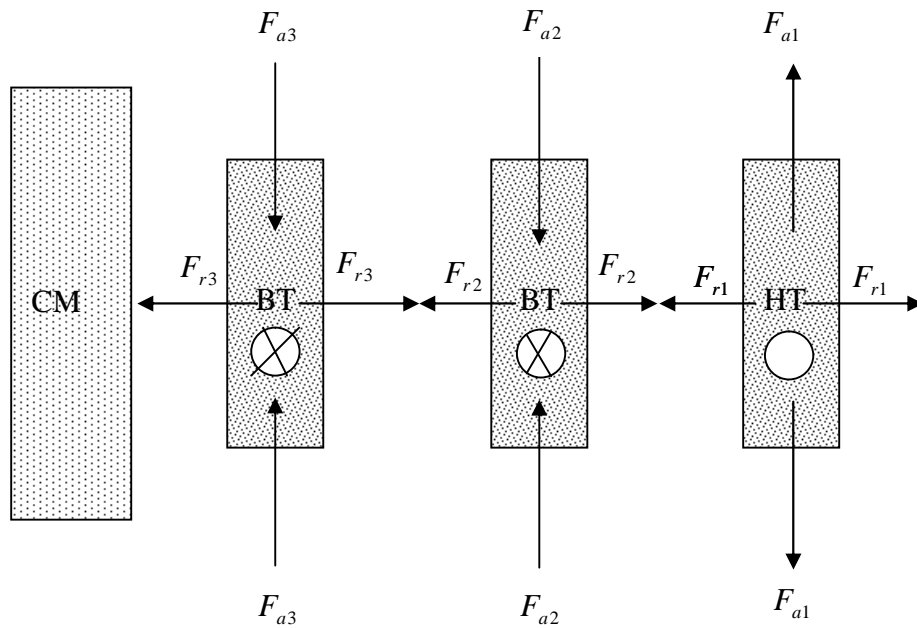
$$Frj = \frac{\mu_0}{2} \cdot (n_j \cdot I_{cc\max})^2 \cdot \frac{L_{mj} \cdot K_r}{h_{Bj}} \quad [kgf] \quad (VI-10)$$

$L_{mj}$  : Longueur moyenne d'une spire.

$K_r$  : Coefficient de **ROGOVSKI**.

$h_{Bj}$  : Hauteur de la bobine.

$n_j$  : Nombre de spire de l'enroulement.



**Figure VI-1 : Efforts électro-dynamique exercés sur les enroulements.**

- Dans l'enroulement primaire :

$$F_{r1} = \frac{\mu_0}{2} \cdot (n_1 \cdot I_{cc1\max})^2 \cdot \frac{L_{moy1} \cdot K_r}{h_{B1}} \quad [kgf] \quad (VI-11)$$

Soit

$$F_{r1} = 7,32 \cdot 10^5 \text{ Kgf}$$

- Dans l'enroulement secondaire :

$$F_{r2} = \frac{\mu_0}{2} \cdot (n_2 \cdot I_{cc2\max})^2 \cdot \frac{L_{moy2} \cdot K_r}{h_{B2}} \quad [kgf] \quad (VI-12)$$

D'où

$$F_{r2} = 5,31 \cdot 10^5 \text{ Kgf}$$

- Dans l'enroulement tertiaire :

$$F_{r3} = \frac{\mu_0}{2} \cdot (n_3 \cdot I_{cc3\max})^2 \cdot \frac{L_{moy3} \cdot K_r}{h_{B3}} \quad [kgf] \quad (VI-13)$$

Soit :

$$F_{r3} = 3,25 \cdot 10^5 \text{ Kgf}$$

### VI-1-2-2- Forces axiales

Les forces axiales sont fortement influencées par les dissymétries dans les dispositions des enroulements, les valeurs des forces de court-circuit sont donnée par :

$$F_{aj} = Fr_j \cdot \frac{a_r}{2h_{Bj}} \quad [kgf] \quad (VI-14)$$

$a_r$  : Epaisseurs du canal de fuites en  $[mm]$ .

➤ Dans l'enroulement primaire :

$$Fa1 = Fr1 \cdot \frac{a_r}{2h_{B1}} \quad [kgf] \quad (VI-15)$$

Alors

$$Fa1 = 2,97 \cdot 10^4 \text{ Kgf}$$

➤ Dans l'enroulement secondaire :

$$Fa2 = Fr2 \cdot \frac{a_r}{2h_{B2}} \quad [kgf] \quad (VI-16)$$

Alors

$$Fa2 = 2,25 \cdot 10^4 \text{ Kgf}$$

➤ Dans l'enroulement tertiaire :

$$Fa3 = Fr3 \cdot \frac{a_r}{2h_{B3}} \quad [kgf] \quad (VI-17)$$

Soit

$$Fa3 = 1,21 \cdot 10^4 \text{ Kgf}$$

### VI-1-3- Calcul des efforts unitaires produits

#### VI-1-3-1-Efforts radiaux

• Dans l'enroulement primaire :

$$\sigma_{r1} = \frac{Fr1 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot \pi \cdot n_1 \cdot S_{con1n}} \quad (VI-18)$$

$n_1$  : Nombre de conducteurs élémentaires.

$S_{con1n}$  : Section du conducteur en  $[cm^2]$ .

$$\sigma_{r1} = 1,49 \cdot 10^4 \text{ Kgf} / cm^2$$

• Dans l'enroulements secondaire :

$$\sigma_{r2} = \frac{Fr2.10^{-2}}{2.\pi.n_2.S_{con2n}} \quad (VI-19)$$

: Nombre de conducteurs élémentaires.

$S_{con2n}$  : Section du conducteur en  $[cm^2]$ .

$$\sigma_{r2} = 143,31Kgf / cm^2$$

- **Dans l'enroulements tertiaire :**

$$\sigma_{r3} = \frac{Fr3.10^{-2}}{2.\pi.n_3.S_{con3n}} \quad [kgf / cm^2] \quad (VI-2)$$

$n_3$  : Nombre de conducteurs élémentaires.

$S_{con3n}$  : Section du conducteur en  $[cm^2]$ .

$$\sigma_{r3} = 154,02Kgf / cm^2$$

### VI-1-3-2-Efforts axiaux

- **Dans l'enroulement primaire :**

$$\sigma_{a1} = \frac{Fa1}{\pi.D_{moy1}.a_1} \quad [kgf / cm^2] \quad (VI-21)$$

$a_1$  : Epaisseur de l'enroulement.

$D_{moy1}$  : Diamètre moyenne d'une spire.

$$\sigma_{a1} = 20,62Kgf / cm^2$$

- **Dans l'enroulement secondaire :**

$$\sigma_{a2} = \frac{Fa2}{\pi.D_{moy2}.a_2} \quad [kgf / cm^2] \quad (VI-22)$$

$a_2$  : Epaisseur de l'enroulement.

$D_{m1}$  : Diamètre moyenne de l'enroulement.

$$\sigma_{a2} = 47,33Kgf / cm^2$$

- **Dans l'enroulement tertiaire :**

$$\sigma_{a3} = \frac{Fa3}{\pi.D_{m3}.a_3} \quad [kgf / cm^2] \quad (VI-23)$$

$a_3$  : Epaisseur de l'enroulement.

$D_{m3}$  : Diamètre moyenne de l'enroulement.

$$\sigma_{a3} = 42,26 \text{Kgf} / \text{cm}^2$$

**Remarque :**

Les efforts unitaires axiaux et radiaux auxquels sont soumis les enroulements primaire, secondaire et tertiaire ne doivent pas dépasser l'effort admissible du cuivre qui est de  $700 \text{kgf} / \text{cm}^2$  ; si cette condition n'est pas réalisée, on recalcule de nouveau les valeurs de X et Y de la section utilisée ou on recalcule le diamètre de la colonne, afin que les enroulements aient une bonne tenue aux efforts électrodynamique de court-circuit.

## VI-2-Calcul des parties constructives

### VI-2-1-Ferrures de serrage

Le serrage des ferrures se fait à l'aide de huit boulons (tiges). Chaque tige est soumise à un effort de traction dû à l'effort de réaction des ferrures de serrage.

Les ferrures doivent être choisies de façon à résister aux pressions développées par les boulons de serrage. Le serrage doit être parfait pour éviter les variations et réduire ainsi le bruit du transformateur. Les boulons utilisés sont de nuance  $A_{48}$  dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Traction égale à Résistance minimale de rupture égale à  $4800 \text{kgf} / \text{cm}^2$ ,
- Contrainte admissible  $1200$  égale à  $\text{kgf} / \text{cm}^2$ .

On assimile la longueur de la ferrure à la distance entre les axes de deux boulons. Les forces de réaction de tôles serrées et le poids de la partie décuvable exercent sur les boulons des contraintes  $R_1$  et  $R_2$  (figure VI.2) qui sont respectivement la force de traction des boulons d'extrémités, et la force de traction des boulons traversant la culasse. Ces contraintes sont données par les formules suivantes :

$$R_1 = \frac{3}{16} \cdot F \quad [\text{kg} \cdot f] \quad (\text{VI.24})$$

$$R_2 = \frac{5}{16} \cdot F \quad [\text{kg} \cdot f] \quad (\text{VI.25})$$

$R_1$  : Force de traction des boulons d'extrémités.

$R_2$  : Force de traction des boulons traversant les culasses.

La force total exercée sur les tôles est donnée par la relation suivante :

$$F = P \cdot B_{S6} \cdot L_n \quad [\text{Kg} \cdot f]$$

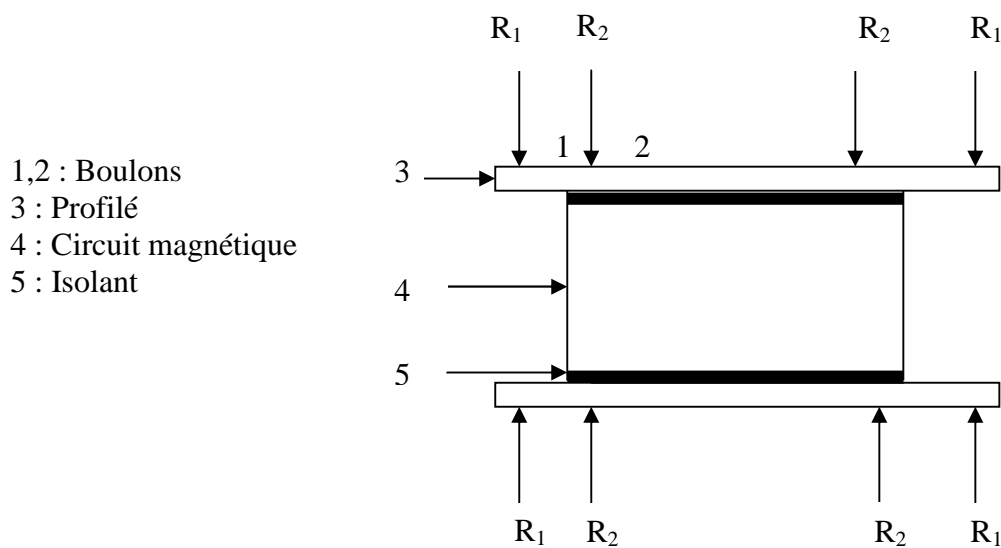
- P : Pression entre la culasse et les ferrures de serrage par unité de surface considérée uniformément répartie. Sa valeur est comprise entre 2 et 6  $\text{Kgf/cm}^2$ , et on choisit  $P = 4\text{Kgf/cm}^2$ .

$L_n$  : La longueur du noyau.

$$F = 2114,26\text{Kgf}$$

$$R_1 = 396,42\text{Kg.f}$$

$$R_2 = 660,70\text{Kg.f}$$



**Figure VI-2 : Modèle de calcul des forces de réaction des tôles.**

### VI.2.2. Tiges de serrage

Les tiges de serrage sont soumises aux forces de réaction des tôles serrées, que l'on considère comme étant des efforts de traction.

Pour le calcul, on se sert du modèle donné par la figure (VI-2).

On assimile la longueur de la tôle de serrage à la distance entre les axes des tiges des extrémités.

Partant de l'hypothèse que les tiges ne sont soumises qu'aux efforts de traction en considérant que ces derniers sont inférieurs aux contraintes admissibles, on dimensionne les tiges comme suit :

$$\sigma_t = \frac{R_2}{S_2} = \frac{4R_2}{\pi d^2} \leq \sigma_{tr}$$

#### ❖ Dimensionnement des boulons :

Il consiste à calculer le diamètre des boulons, en considérant la force de traction la plus importante et que les efforts qui s'y produisent doivent être plus petits que les efforts unitaires. Pour cela on vérifie la condition suivante :

$$\sigma_t = \frac{R_2}{S} \leq \sigma_{tr} \quad [kg \cdot f / cm]$$

- $\sigma_t$  : Contrainte de traction.
- $\sigma_{tr} = 1000 \text{ kg.f/cm}$  : Contrainte de traction de rupture.

Le diamètre des boulons de serrage sera donné par la formule suivante :

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot R_2}{\pi \cdot \sigma_{tr}}} [cm]$$

$d \approx 1 \text{ cm}$       comme diamètre du boulon le plus sollicité

### VI.2.3. Tirants de serrage

La partie décuvable est suspendue au couvercle par des tirants qui relient les ferrures supérieures aux ferrures inférieures.

Le diamètre des tirants est donné en fonction du moment de serrage. Chaque tirant supporte le quart du poids de la partie décuvable et est soumis à la traction d'une force  $F_n$ , son moment est donné par :

$$M_t = \frac{3}{4} \cdot (\sum F_n) \cdot C \times 10^{-2} \quad [kg \cdot f \cdot m] \quad (VI.26)$$

$C[m]$  : Facteur clé donné en fonction de la puissance apparente du transformateur.

- $\sum F_n$  : Force de pressage par spire ; elle est donnée par la formule suivante :

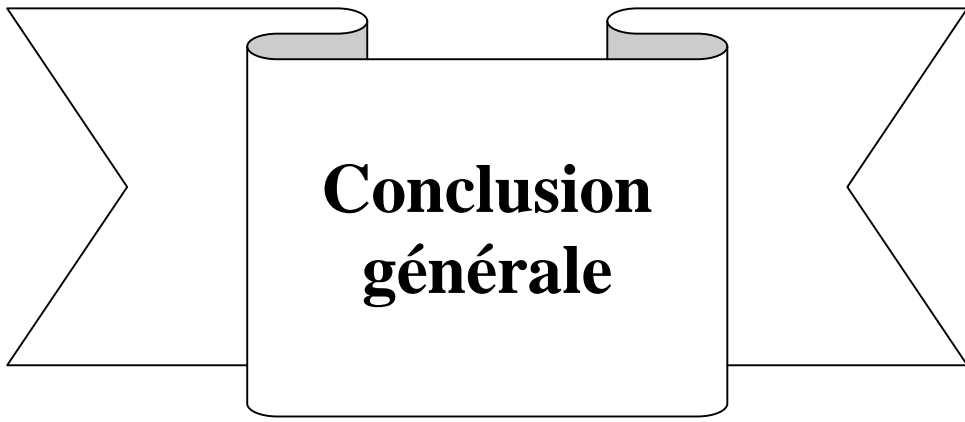
$$\sum F_n = 2 \cdot \frac{1,4 \cdot F_{r2}}{n_2} \quad [kg \cdot f]$$

$$\sum F_n = 4,42 \cdot 10^4 \text{ kg.f}$$

On prend  $C=0,0022 \text{ m}$

On obtient :

$$M_t = 72,93 \text{ kg.f.m}$$



**Conclusion  
générale**

# conclusion générale

Dans ce modeste travail, nous avons eu l'occasion de traiter des différentes étapes d'étude et réalisation d'un transformateur triphasé à trois enroulements de puissance 1250kVA et de tensions 30kV/690V/690V, immergé dans l'huile, de constater l'importance de la maîtrise des différentes paramètres et règles régissant le fonctionnement d'un transformateur, et de relever l'influence de chacun de ces paramètres.

L'étude pratique que nous avons effectuée au sein de l'Électro-Industries, nous a permis d'avoir plus de données et d'informations concernant le monde industriel.

Les résultats obtenus sont satisfaisants et répondent aux exigences du cahier des charges.

Pour la partie thermique, les échauffements calculés ne dépassent pas les valeurs limites, ce qui confirme le bon choix effectué au niveau du calcul électromagnétique, du dimensionnement du circuit magnétique et des enroulements.

L'avantage majeur du transformateur à trois enroulements est qu'on peut l'installer à la place de deux transformateurs à deux enroulements, ce qui permet au client de faire des économies.

Mais il présente des inconvénients. En effet, sa sécurité est moins grande : en cas de défaillance de l'un de ses enroulements il se met hors service tout entier, alors qu'en cas de défaillance de l'un des transformateurs à deux enroulements, l'autre peut fonctionner normalement.

Vu l'indisponibilité de la documentation sur les transformateurs à trois enroulements et le manque de normes appropriées, nous souhaitons à l'avenir qu'une étude plus approfondie lui sera consacrée.

# BIBLIOGRAPHIE

[1] **M. SADOK**

« Cours photocopié de TEC 420 ( [8] **Document l'ENEL AZAZGA**

Machines Electriques I) »  
UMMTO, 2006

[2] **M.KOSTENKO et PIOTROVSKI**

« Machines électriques – Tome I Machines à courant continu, Transformateurs »  
Edition Mir Moscou, 1979.

[3] **A. GUILBERT**

« Circuits magnétiques à courant alternatif, transformateurs »  
Edition MASSON & Cie, Paris 1973.

[4] **A. BOUDISSA, B.AKLIOUAT et L.BELLAHSENE**

« Etude et réalisation d'un transformateur triphasé à trois enroulements  
1250 kVA -30kV /690V /690V, immergé dans l'huile »  
Mémoire d'ingénieurs, UMMTO, Promotion 2008

[5] **M.S.ADJAEMOUT et AMERABTENE**

« Etude thermique et mécanique d'un transformateur triphasé hermétique de distribution  
100kVA -30 kV/400V »  
Mémoire d'ingénieurs, UMMTO, Promotion 1994

[6] **B.ABROUS et K.TAGZIRIA**

« Calcul d'un transformateur de distribution 250kVA -20kV/400V »  
Mémoire d'ingénieurs, UMMTO, Promotion 1988

[7] **Z.FEREKA, O.TIBELGHAI et S.MEZIANI**

« Calcul et dimensionnement d'un autotransformateur triphasé 32MVA  
230kV/121kV/6,6kV »  
Mémoire d'ingénieurs, UMMTO, Promotion 2001

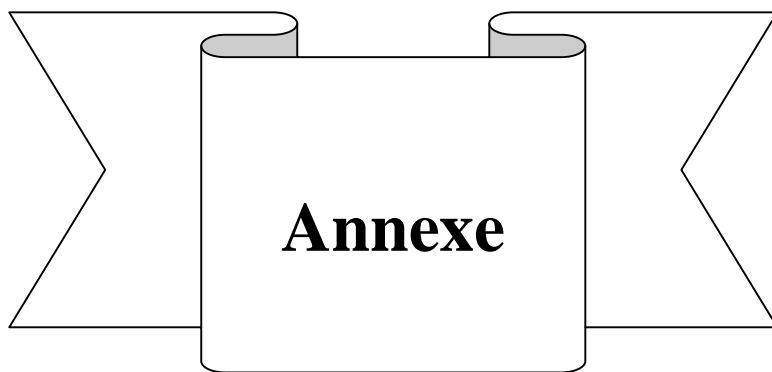
[8] Documentation ENEL.

[9] **K.DJAROUN et F.KACI**

« Calcul d'un transformateur de distribution hermétique de 315kVA -10kV/400V».  
Mémoire d'ingénieurs, UMMTO, Promotion 2003

[10] **N.DAFFEUR et F.AMENSOUR**

« Etude d'un transformateur triphasé 2,8 kVA -380V /225V, Comparaison avec le transformateur didactique DE LORENZO modèle, DL 2080 de même puissance».  
Mémoire d'ingénieurs, UMMTO, Promotion 2001



## Annexe :

La loi de Bochtrot :

$$U_{SP} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot \hat{B} \cdot S_{fer}$$

$$\bar{V}_1 = jn_1 \omega \Phi_0 + r \bar{I}_{10} + j l_1 \omega \bar{I}_{10} \approx jn_1 \omega \Phi_0$$

Car :  $r \bar{I}_{10} = 0$  et  $j l_1 \omega \bar{I}_{10} = 0$

- Pour un transformateur à trois enroulements on a :  $\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3$

Les équations de tension en module :

$$V_1 = n_1 \omega \Phi_0 = n_1 2\pi f B S_{fer} = n_1 2\pi f \frac{\hat{B}}{\sqrt{2}} S_{fer} \quad \Rightarrow V_1 = n_1 \sqrt{2} \pi f \hat{B} S_{fer}$$

$$U_{SP} = \frac{V_1}{n_1} = \frac{n_1 \sqrt{2} \pi f \hat{B} S_{fer}}{n_1} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot \hat{B} \cdot S_{fer}$$

On a (à vide) :

$$\bar{V}_1 = r_1 \bar{I}_{10} + j(L_{p1} + l_1 + l_{12} + l_{13})$$

$$\bar{V}_{20} = j(M_{12} + m_{12}) \omega \bar{I}_{10}$$

$$\bar{V}_{30} = j(M_{13} + m_{13}) \omega \bar{I}_{10}$$

Les inductances de fuites sont négligeables.

On a :  $L_{p1} = \frac{n_1 \Phi}{I_{10}}$

$$\Rightarrow j L_{p1} \omega \bar{I}_{10} = j n_1 \omega \Phi$$

Donc :

$$\bar{V}_1 = j n_1 \omega \Phi$$

$$\bar{V}_{20} = j M_{12} \omega I_{10} \approx j n_2 \omega \Phi$$

$$\bar{V}_{30} = j M_{13} \omega I_{10} \approx j n_3 \omega \Phi$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \bar{V}_1 = j n_1 \omega \Phi \\ \bar{V}_{20} = j n_2 \omega \Phi \\ \bar{V}_{30} = j n_3 \omega \Phi \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_1 = n_1 \cdot \omega \cdot B \cdot S_{fer} \\ V_{20} = n_2 \cdot \omega \cdot B \cdot S_{fer} \\ V_{30} = n_3 \cdot \omega \cdot B \cdot S_{fer} \end{cases}$$

Pour les tensions de spire :  $\frac{V_1}{n_1} = \frac{V_{20}}{n_2} = \frac{V_{30}}{n_3} = U_{SP}$