
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA



Faculté de technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire de fin de cycle

Pour l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Option : Machines Electriques

Thème

Calcul thermique d'un transformateur monophasé

Présenté par :

IKHEDJI MOHAMED AMOKRANE

Encadreur : Mr. ALITOUCHE K

Année Universitaire : 2020/2021



Remerciements

Nous tenons à remercier en premier lieu le Dieu tout puissant pour nous avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à notre encadreur Mr ALITOUCHE.K qui n'a pas hésité à mettre à notre disposition ses connaissances, ses multiples conseils et instructions et qui nous a également dirigés tout le long de ce travail ainsi que pour la confiance qu'il nous a témoigné.

Nous ne manquerons pas de remercier chaleureusement Mr YOUNCFI.R le responsable de hall technologie.

Nous voudrions remercier spécialement nos enseignants de la faculté sciences et technologies pour leurs aides et qui ont contribué à notre formation d'étude.

Nous remercions les membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail.

Merci à nos familles de nous avoir encouragé et soutenu le long de notre cursus et parcours universitaire.

Dédicaces

Je tiens vivement, à dédier ce modeste

Travail :

*A mes très chers parents qui m'ont tant aidé tout au long de
mes*

Études, que dieu le tout puissant vous garde, et vous procure

Santé, bonheur et longue vie à son adoration ;

*A mes frères et sœurs ainsi que tous les membres de ma
famille ;*

A tous mes proches ;

A tous mes amis et camarades ;

Mohamed Amokrane

Sommaire

I. Table des matières

Introduction générale

Chapitre I Généralités sur les transformateurs	1
Introduction	1
I.1 Définition, constitution et principe de fonctionnement :.....	1
I.1.1 Définition :.....	1
I.1.2 Constitution :.....	2
I.1.2.1 circuit magnétique	2
I.1.2.2 circuit électrique	3
I.1.2.3 partie active et partie constructive	3
I.1.3 Principe de fonctionnement :.....	6
I.1.4 Pertes dans le transformateur:.....	8
I.1.4.1 pertes joules	8
I.1.4.2 pertes fer	8
I.1.5 Echauffement et refroidissement des transformateurs.....	9
I.1.5.1 échauffement	9
I.1.5.2 refroidissement	9
I.1.6 Protection des transformateurs :.....	9
I.2 Transformateur monophasé parfait:.....	9
I.2.1 Transformateur monophasé parfait à vide :	11
I.2.2 Transformateur monophasé parfait en charge :.....	12
I.3 Transformateur monophasé réel:.....	13
I.3.1 Transformateur monophasé réel essai à vide:.....	13
I.3.2 Transformateur monophasé réel en charge :.....	14
I.3.3 Essai en court-circuit :	15
I.3.4 Circuit simplifié dans l'hypothèse de Kapp:.....	16
I.4 Types de transformateur:	17
I.4.1 Intensifier et abaisser le transformateur :.....	18
I.4.2 Transformateur de puissance :	18
I.4.3 Transformateur de distribution :	18
I.4.4 Transformateur d'instrument de courant :	19
I.4.5 Transformateur d'instrument de potentiel :.....	19
I.4.6 Transformateur monophasé :	19
I.4.7 Transformateur triphasé:	20

Sommaire

I.5	Etude comparative avec et sans le phénomène de saturation:	20
I.5.1	Sans la saturation :	20
I.5.2	Avec saturation :	21
Conclusion	22
Chapitre II	Calcul thermique d'un transformateur monophasé :	23
II.1	Introduction :	23
II.2	Description des problèmes thermique dans transformateur:	23
II.2.1	Modèle thermique :	24
II.3	Description du logiciel FEMM (Finite Element Method Magnetics):	24
II.3.1	Modélisation par éléments finis avec logiciel FEMM :	25
II.3.2	Choix et méthode d'étude :	26
II.3.3	Domaine "Magnétique", Modèles Electromagnétiques :	26
II.3.4	Les méthodes numériques:	28
II.4	Transferts thermique :	29
II.4.1	Modes de transfert thermique :	29
II.4.2	La modélisation thermique :	33
II.4.3	Définitions des grandeurs :	34
II.5	Transferts thermique dans le transformateur:	36
II.6	Différents pertes dans le transformateur :	38
II.6.1	Modèles de Pertes Cuivre :	39
II.6.2	Pertes fer dans les noyaux magnétiques :	40
Conclusion	41
Chapitre III	Simulation numérique de transfert thermique dans un transformateur monophasé :	44
III.1	Introduction :	44
III.2	Simulation selon le logiciel FEMM :	44
III.3	Présentation de Logiciel FEMM:	44
III.3.1	Définition :	44
III.3.2	Processus sur logiciel FEMM :	45
III.4	Etude du problème magnétique et problème thermique :	46
III.4.1	Simulation de problème magnétique :	46
III.4.2	Simulation de problème thermique :	47
Conclusion	61
Conclusion générale		
Références bibliographiques		

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II. 1 : Analogie thermique-électrique.....p35

Chapitre II

Tableau III. 1 : Matériaux utilisé dans transformateur.....p47

Chapitre III

Tableau III. 1 : Matériaux utilisé dans transformateur.....p47

Tableau III. 2 : Matériaux utilisé dans transformateur.....p53

Tableau III. 3 :Condition de fonctionnement en charge.....p57

Liste des figures

Chapitre I

Figure I. 1 : Circuit magnétique colonne..... P2

Figure I. 2 : Circuit magnétique de forme cuirassée.....P2

Figure I 3 : Emplacement des enroulements sur la culasse.....p4

Figure I. 4 : Montage de cuve d'un transformateur.....p6

Figure I. 5 : Schéma simplifié d'un transformateur monophasé.....P7

Figure I. 6 : Le flux magnétique est noté ϕp8

Figure I. 7 : Transformateur monophasé parfait.....p10

Figure I. 8 : Transformateur monophasé parfait à vide.....p11

figure I.10 : circuit magnétique équivalent p12

Figure I. 9 : Transformateur monophasé en charge.....p12

Figure I. 11 : schéma équivalent du transformateur réel.....p13

Figure I. 12 : Transformateur monophasé réel à vide.....p14

Figure I. 13 : Transformateur monophasé réel en charge.....p15

Figure I. 14 : Circuit simplifié dans l'hypothèse de Kapp.....	p16
Figure I. 15 : Schéma équivalent ramené au secondaire.....	p16
Figure I. 16 : Schéma représente la zone linéaire et non linéaire de la courbe $\Phi(I)$	p21

Chapitre II

Figure II. 1 : Conduction thermique dans un solide sous une différence de température.....	p30
Figure II. 2 : Echange thermique par convection d'une surface avec son extérieure.....	p31
Figure II. 3 : Echange thermique par rayonnement d'une surface avec son extérieur.....	p33
Figure II. 4 : empirique à une résistance thermique équivalente.....	p35
Figure II. 5 : modèle par réseau de résistances thermiques.....	p36
Figure II. 6 : Effet de peau dans un conducteur.....	p39
Figure II. 7 : Effet de proximité.....	p40
Figure II. 8 : Courbe d'hystérésis d'un matériau magnétique.....	p41

Chapitre III

Figure III. 1 : Différentes étapes de calcul sous FEMM.....	p45
Figure III. 2 : Dimension de transformateur monophasé (<i>es dimensions en mètre</i>).....	p46
Figure III. 3 : Conditions aux limites sur le contour extérieur de la zone étudié.....	p47
Figure III. 4 : Maillage en éléments finis du système.....	p48
Figure III.5 : Flux magnétique en fonction du courant à vide.....	p49
Figure III. 6 : Induction magnétique dans le transformateur en cas à vide.....	p49
Figure III. 7 : Induction magnétique en fonction de la longueur	p50
Figure III.8 : Induction magnétique dans le transformateur en charge.....	p51
Figure III.9 : Induction magnétique en fonction de la longueur cas en charge	p52
Figure III.10 : Conditions aux limites sur transformateur.....	p53
Figure III. 11 : Maillage en éléments finis du système.....	p53
Figure III. 12: Répartition de la température dans le transformateur en cas à vide.....	p55
Figure III.13 : Courbe de variation de la température dans différents zone de transformateur cas à vide.....	p56
Figure III. 14 : Répartition de la température dans le transformateur en charge.....	p58
Figure III. 15: Courbe de variation de la température dans différents zone de transformateur en charge.....	p59



Introduction générale

Introduction générale

La présente étude des phénomènes magnétique et thermiques dans un transformateur s'intéresse pour but d'évaluer et d'améliorer le comportement des grandeurs du transformateur et le transfert de chaleur dans circuit magnétique.

Mon travail s'articule autour d'une étude l'évaluation du comportement magnétique et thermique des transformateurs à base de la méthode des éléments finis en basant sur études des géométries des transformateurs et non linéaires.

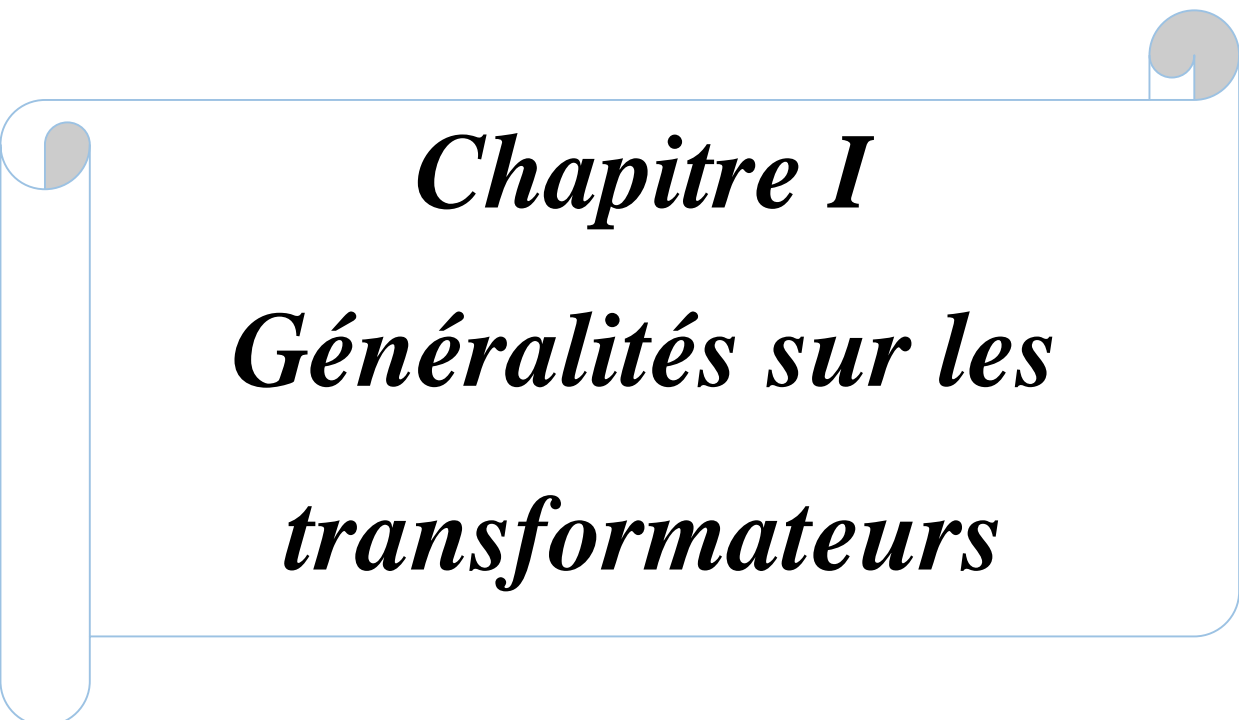
Dans le cadre de ce travail, trois chapitres seront présentés :

Le premier chapitre est consacré a évoqué les essentielles des transformateurs et le principe de fonctionnement des transformateurs en général.

Puis deuxième chapitre est consacré à la modélisation thermique et magnétique. De cernés la majorité des points rencontrés dans le phénomène thermique dans le transformateur, en se basant sur les théories et les équations de Maxwell. Puis sur le transfert thermique en générale précisément sur transferts thermique dans transformateur soit par (convection, conduction et rayonnement) et sur les différents types de perte peut rencontrer dans le transformateur. Ensuite, je présente la méthode des éléments finis appliqué à un modèle électromagnétique adapté au problème thermique étudié.

Ensuite troisième chapitre est consacré à la simulation numérique de transfert thermique dans transformateur monophasé à base de logiciel des éléments finis FEMM, en étudiant l'élévation de température T générée par les différentes pertes et la répartition de la température dans différents points de transformateur avec conditions de fonctionnement différentes. Pour enfin comprendre et pouvoir prendre en compte des points importants dans la façon de fabriquer et même dans la maintenance de transformateur.

Enfin je termine mon présent travail par une conclusion générale.



Chapitre I
Généralités sur les
transformateurs

Introduction :

Un transformateur a pour but de modifier les amplitudes des grandeurs électriques alternatives, il transforme des signaux de tension et de courant de fréquence donnée en signaux de même fréquence mais de valeurs efficaces différentes.

L'une des particularités du transformateur est qu'il a un rendement très élevé, souvent proche de 100 %, dans les gros transformateurs, on a moins de 1 % de pertes. Pour simplifier, nous ne considérerons ici que le cas du transformateur monophasé, mais les principes physiques abordés s'appliquent aussi au cas du transformateur triphasé [1].

I.1 Définition, constitution et principe de fonctionnement :

I.1.1 Définition :

Le transformateur est un élément statique à induction électromagnétique, permettant à transformer un système de tension et de l'intensité du courant délivrés par une source d'énergie électrique alternatif en un système de tension et de courant de valeurs différentes, la modification des grandeurs (tension, courant) sans changer leur fréquence, Il effectue cette transformation avec un excellent rendement.

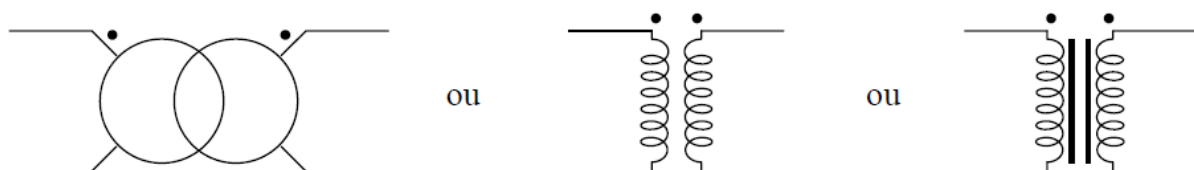
L'énergie est transférée du primaire au secondaire par l'intermédiaire du circuit magnétique que constitue la carcasse du transformateur. Ces deux circuits sont alors magnétiquement couplés. Ceci permet de réaliser un isolement galvanique entre les deux circuits [2, 3, 4].

I.1.2 Constitution :

Le transformateur est constitué essentiellement de circuit magnétique et de circuit électrique:

- ✓ Un Circuit magnétique fermé.
- ✓ Un Enroulement primaire (Bobine 1) de N_1 spires
- ✓ Un Enroulement secondaire (Bobine 2) de N_2 spires

Symboles du transformateur monophasé :



I.1.2.1 Circuit magnétique :

Le but d'un circuit magnétique de transformateur est de canaliser le flux magnétique Φ [Wb] et de présenter le minimum de pertes par Hystérésis et par courant de Foucault ensuite fournir un chemin de basse réluctance pour le flux magnétique qui lie les enroulements primaire et secondaire. Afin d'optimiser le passage de cette induction avec un minimum de matière l'élément de base est la tôle de circuit magnétique en fer à grains orientés isolées [6].

Le circuit magnétique est de tonnes de tôles (souvent une dizaine) ne faisant que quelques dixièmes de mm d'épaisseur : de 0,28 à 0,35 mm, et est composé de différentes formes soit à 2 colonnes formées par un empilage de tôles décalées (figure I.1), Soit de forme cuirassée, c'est-à-dire que les enroulements sont placés sur une colonne centrale et le flux magnétique Φ [Wb] se referme par chacun des côtés qui forment la cuirasse (figure I.2) [6].

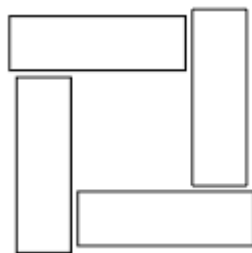


Figure a : Circuit magnétique à colonne couche 1.

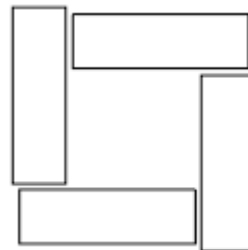
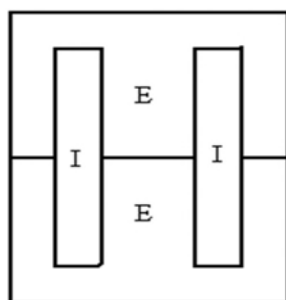
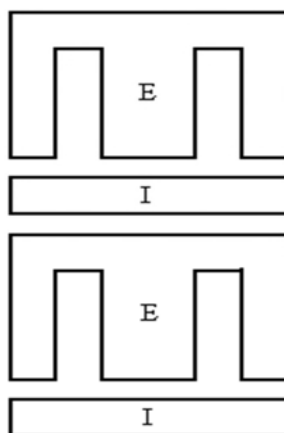


Figure b : Circuit magnétique à colonne couche 2.

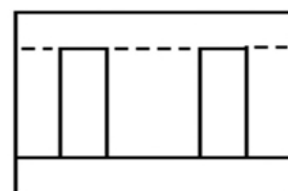
Figure I. 1 : Circuit magnétique à colonne.



a) tôle de départ



b) résultat de la découpe



c) noyau assemblé (les pointillés indiquent la position des tôles d'une couche cachée en cas d'enchevêtrement)

Figure I. 2 : Circuit magnétique de forme cuirassée

I.1.2.2 Circuit électrique :

Les transformateurs de base tension et de faible puissance, les enroulements primaire et secondaire sont constitués par des bobines en fil de cuivre émaillé, chaque couche étant isolée de la suivante par du papier. Pour les transformateurs à haute tension et grande puissance, les bobines, fractionnées en galettes, sont constituées par du fil rond ou méplat isolé au carton imprégné et séparées par des isolants tels que fibre [6].

I.1.2.3 Partie active et partie constructive :

1. Partie active :

Représente l'ensemble électromécanique situé au cœur du transformateur : circuit magnétique, bobinages, diélectrique et isolants solides. C'est dans la partie active que l'énergie électrique est transformée.

1.a circuit magnétique :

Le circuit magnétique ou noyau sont juste des assemblages de tôles fines généralement ferromagnétiques disposées dans un même plan parallèlement et perpendiculairement les unes aux autres comportant deux culasses et trois colonnes de même section.

- **Assemblage :** Le serrage des tôles est effectué par des tiges feuillettes, régulièrement réparties et isolées du circuit magnétique. Les vis ou rivets d'assemblage ne doivent pas former des circuits conducteurs unissant les tôles.
- **Section des colonnes :** les sections sont carrées, on réalise des sections circulaires pour les grosses puissances. En effet, les bobinages sont à section circulaire pour des raisons de résistance aux efforts électrodynamiques entre spires en cas de court-circuit et pour une réalisation plus facile.
- **Joints :** La réalisation de joints magnétiques qui réduisent le plus possible l'entrefer dans un circuit magnétique permet d'obtenir la réluctance minimale du circuit donc des faibles pertes, Le principe de réalisation est le même pour les transformateurs monophasés et triphasés. Sauf que dans le cas des transformateurs triphasés, des canaux de refroidissement peuvent être aménagés pour les gros circuits magnétiques [14].

1.d Enroulements :

Les enroulements sont réalisés à partir des conducteurs en cuivre, méplat ou en aluminium de section circulaire ou rectangulaire isolés avec du vernis ou de papier isolant. Les formes de bobinages, les sections et les nombres de spires sont conditionnés par les contraintes à maîtriser en termes électriques, thermiques et mécaniques. Chaque bobine est munie de canaux de refroidissement pour assurer la circulation d'huile du fait des échanges thermiques.

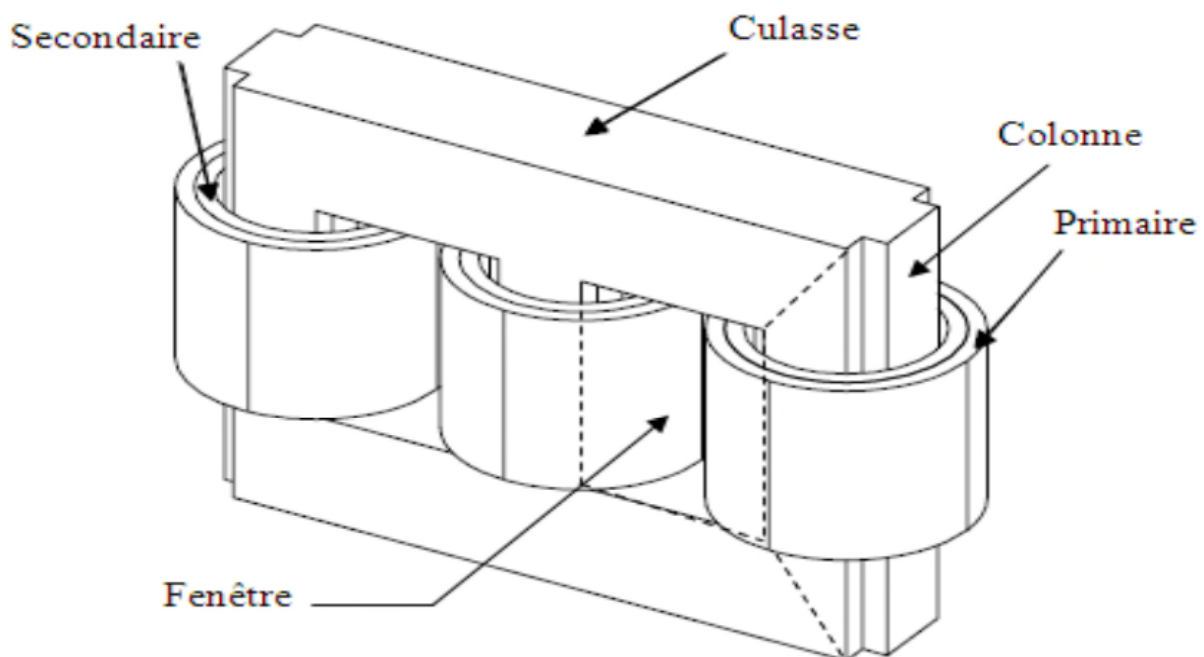


Figure I. 3 : Emplacement des enroulements sur la culasse

Les deux enroulements (primaire et secondaire) sont montés sur les colonnes (ou noyau) du circuit magnétique. L'enroulement primaire a pour rôle de créer un champ alternatif et celui du secondaire la production du courant induit.

1.c Isolants :

L'isolation de la partie active est d'une grande importance et déterminante pour le bon fonctionnement du transformateur pour cela, les conducteurs, les bobines et les connexions doivent être isolées entre elles par rapport à la masse, au circuit magnétique, à la cuve et au couvercle. Les isolateurs sont à base de Papiers, de cellulose, rubans, vernis, résines époxydes, carton et de bois. Les isolants solides assurent la rigidité diélectrique et apportent, en plus du noyau, une résistance mécanique globale. Les papiers captent et retiennent les dépôts issus de la dégradation des matériaux : ils jouent un rôle de purificateur d'huile et se

dégradent lentement. Ajoutée au vieillissement, cette dégradation altère les propriétés de l'huile entraînant à terme un risque de claquage du transformateur.

Isolement des conducteurs : L'isolation des conducteurs se fait soit en vernis ou en papier imprégné, suivant les dimensions des fils.

L'isolement de la bobine : L'isolement des bobines basse tension des circuits magnétique est réalisé par un tube en presspahn (psp) pour le papier bakélinisé avec ou sans cale, monté sur la colonne de circuit magnétique.

1.d Diélectriques :

Les parties actives d'un transformateur sont immergées dans un liquide isolant et caloporteur, qui assure à la fois l'isolement et le refroidissement du transformateur, cette l'isolation peut être assurée par de l'air pour les petits transformateurs BT, de l'huile très employée dans tous les transformateurs de puissance, mais elle présente des risques d'incendie et d'explosion ou du quart, c'est un sable qui étouffe les flammes mais rend le refroidissement plus difficile.

2. Partie constructive :

Le transformateur comprend en plus des parties actives une série d'éléments mécaniques qu'on appelle pièces constructives, destinés à la fixation et au refroidissement de la partie active au branchement des enroulent sur le réseau électrique.

2.a La cuve :

La cuve constitue l'enveloppe protectrice de la partie active, un contenant au diélectrique liquide, elle a une grande surface en contact avec l'air pour faciliter l'évacuation de la chaleur. Elle est constituée de trois parties fondamentales.

2.b Parois ondulées :

Constituent les quatre facettes de la cuve en forme d'ondulations qui servent de surfaces de dissipation de la chaleur.

2.c Partie inférieure :

C'est la basse de la cuve qui sert également de contenant au diélectrique liquide.

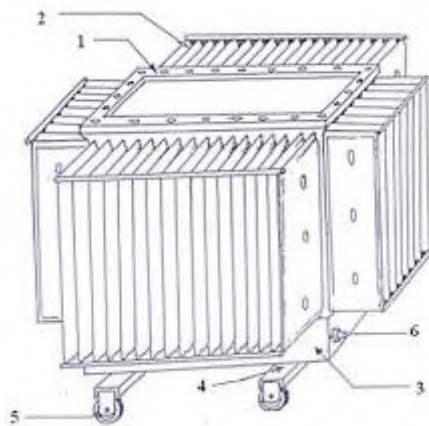
2.d Cadre :

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

2.e Couvercle :

Il représente la partie supérieure de transformateur, son rôle est de fermer la cuve, d'où la nécessité d'un joint entache.

- ✓ Poche de thermostat : il permet de mesurer la température aux différents niveaux du transformateur.
- ✓ Crochets de levage : ils permettent la manutention et le décuivage.
- ✓ Les traversées haute et basse tension : qui ont pour rôle d'assurer à travers le couvercle, la liaison électrique entre les extrémités des enroulements primaires et secondaires d'une part et les lignes d'arrivée de départ d'autre part [14].



- 1) cadre.
- 2) paroi ondulées.
- 3) partie inférieure.
- 4) support.
- 5) galet de roulement.
- 6) bouche de vidange.

Figure I. 4 : Montage de cuve d'un transformateur

I.1.3 Principe de fonctionnement :

Un transformateur est constitué d'un circuit ferromagnétique fermé portant plusieurs circuits sans liaison conductrice. Un des circuits, nommé primaire est alimenté par une source de tension alternative sinusoïdale, un flux magnétique, forcé par cette alimentation s'établit dans la carcasse magnétique. L'autre circuit appelé secondaire, embrasse ce flux variable et devient le siège d'une force électromotrice (f.e.m) induite due à la loi de Faraday et alimente la charge. Celle-ci induira un courant alternatif qui alimentera les récepteurs d'énergie électrique (figure I.3) [5].

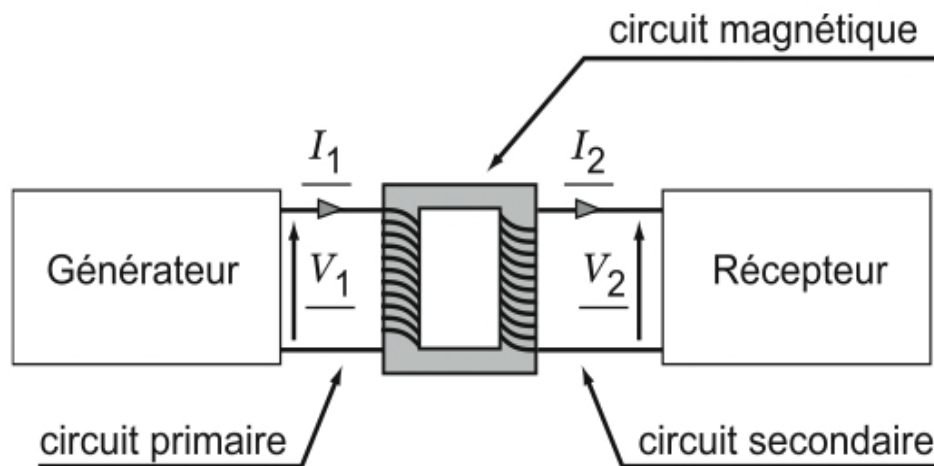


Figure I. 5 : Schéma simplifié d'un transformateur monophasé

Un transformateur comprend :

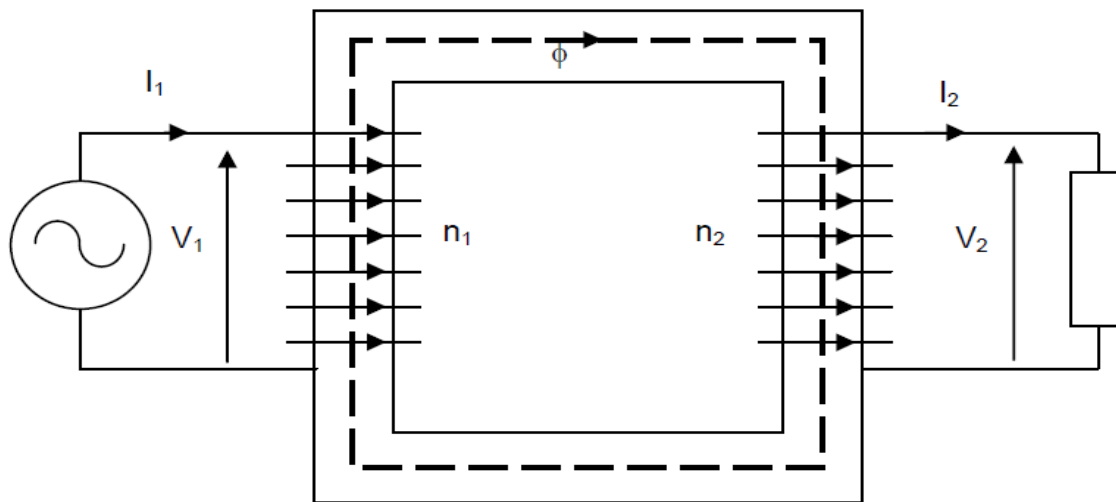
Un circuit magnétique fermé, son rôle est de transmettre le plus efficacement possible l'énergie magnétique du primaire, qui la génère, au secondaire. Pour cela il faut avoir ;

- De perméabilité magnétique aussi haute que possible ;
- D'hystérésis aussi faible que possible pour limiter les pertes ;
- Feuilleté (tôles de 0,2 à 0,3 mm d'épaisseur) afin de limiter les courants de Foucault ;
- De résistance électrique aussi élevée que possible, toujours dans le but d'affaiblir les courants de Foucault, à cette fin on utilise des aciers au silicium ;

Deux enroulements (bobines).

Le primaire alimenté par un générateur de tension alternative de tension V_1 et comportant n_1 spires. Il absorbe le courant I_1 . Le primaire transforme l'énergie électrocinétique reçue en énergie magnétique. C'est un récepteur d'énergie électrique.

Le secondaire comporte n_2 spires ; il fournit, sous la tension V_2 , un courant I_2 au dipôle récepteur. Le secondaire transforme l'énergie magnétique reçue du primaire en énergie électrocinétique. C'est un générateur d'énergie électrique [5].

Figure I. 6 : Le flux magnétique est noté ϕ

Le flux principal crée dans les enroulements des forces électromotrices :

$$e_1 = -n_1 * \frac{d\phi}{dt} \quad \text{et} \quad e_2 = -n_2 * \frac{d\phi}{dt}$$

I.1.4 Pertes dans le transformateur :

I.1.4.1 Pertes joules :

Ces pertes sont produites par l'effet joule dans les enroulements, elles dépendent de la résistance de ces enroulements et du courant qui les traverse.

I.1.4.2 Pertes fer :

Ce sont des pertes dans les tôles du circuit magnétique, elles comportent les pertes par hystérésis et par courant de Foucault. Ces pertes dépendent de la fréquence et de l'induction maximale. Comme ces deux grandeurs sont constantes, il résultant que les pertes fer sont indépendantes de la charge.

- **Par hystérésis** : s'explique par un retard de l'induction sur le champ magnétique appliqué au matériau du circuit magnétique. Ce retard provoque une perte d'énergie sous forme de chaleur à chaque cycle de courant alternatif.
- **Par courant de Foucault** : Le circuit magnétique qui est le siège de l'induction alternative est parcouru par des courants induits appelés (courants de Foucault). Ils produisent par effet joule un dégagement de chaleur au sien du circuit magnétique. Pour les réduire, on feuillette et on empile les tôles, puis on les isole les unes des autres [15].

I.1.5 Echauffement et refroidissement des transformateurs :

I.1.5.1 Échauffement :

L'échauffement se produit par les pertes d'énergie électrique dans la partie active du transformateur pendant son fonctionnement, ce qui nécessite le refroidissement de ce dernier.

I.1.5.2 Refroidissement :

À air : Lorsque le transformateur est placé dans un milieu aéré naturellement, il peut y avoir une diminution de l'échauffement, Ce refroidissement est obtenu par ondulation de la tôle de la cuve pour augmenter la surface d'échange avec le milieu extérieur.

À l'huile : Ce système de refroidissement est assuré par l'huile qui est dans la cuve munie d'ailettes.

Radiateur d'huile : Ce radiateur est indépendant de la cuve est lié avec le transformateur par des tuyaux qui assurent la circulation d'huile dans le radiateur vers le transformateur à l'aide d'une pompe et vice versa.

I.1.6 Protection des transformateurs :

Les différentes contraintes subies par le transformateur obligent le constructeur à prévoir un système de protection, donc des mesures de sécurité doivent être mises en place pour assurer le contrôle des dysfonctionnements on distingue les éléments de protection interne et externe [15].

On peut citer :

Le relais de BUCHHOLZ, éclateurs de coupure, thermomètre et renforcement de l'isolation.

I.2 Transformateur monophasé parfait :

1. Hypothèse :

Un transformateur est parfait si sans aucune perte, et pour but de modéliser les transformateurs réels, et si on néglige [8] :

- ✓ Les résistances des enroulements ; ($r_1=0$) et ($r_2=0$), (pas de pertes de joules).
- ✓ Les inductances de fuite ; ($\ell_1 = 0$) et ($\ell_2 = 0$)
- La réluctance du circuit magnétique. ($\mathfrak{R} f = 0$)

✓ Pas de pertes de Fer.

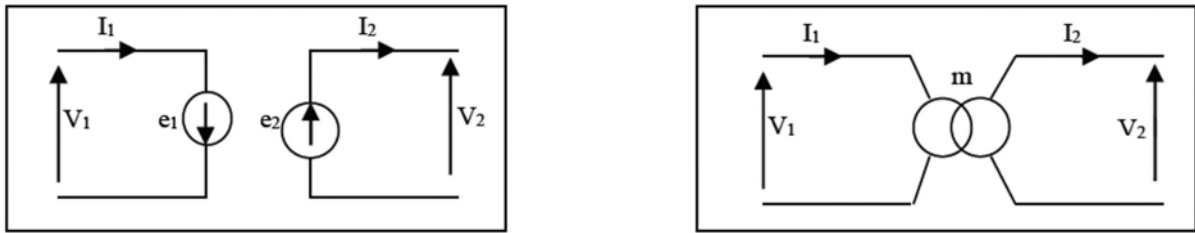


Figure I.7 : Transformateur monophasé parfait

2. Equations électriques :

D'après la loi de mailles du schéma électrique équivalent on aura :

$$V_1(t) = -e_1(t) \text{ avec } e_1(t) = -N_1 * \frac{d\phi(t)}{dt} \text{ et } V_2(t) = e_2(t) \text{ avec } e_2(t) = -N_2 * \frac{d\phi(t)}{dt}$$

$$N_1 * I_1 + N_2 * I_2 = \Re f \phi = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{V_1(t)}{V_2(t)} = -\frac{e_1(t)}{e_2(t)} = -\frac{N_1}{N_2} = \frac{i_2(t)}{i_1(t)}$$

$$\rightarrow \text{En complexe: } \frac{V_2}{V_1} = -\frac{e_2}{e_1} = -\frac{N_2}{N_1} = \frac{i_1}{i_2} = -m$$

Avec m le rapport de transformation.

En valeurs efficaces le rapport de transformation est $m = \frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2}$

On peut distinguer :

$m=1 \Rightarrow V_2 = V_1$: Le transformateur assure l'isolement électrique entre la source et la charge.

$m < 1 \Rightarrow V_2 < V_1$: Le transformateur est dit abaisseur.

$m > 1 \Rightarrow V_2 > V_1$: Le transformateur est dit élévateur.

3. Puissances d'un transformateur parfait :

Puissance apparente : $S_1 = V_1 * I_1 = \frac{V_2}{m} * m * I_2 = V_2 * I_2 \Rightarrow S_1 = S_2$

Puissance active : $P_1 = P_2 = S_1 * \cos \varphi_1 = S_2 * \cos \varphi_2$

Puissance réactive : $Q_1 = Q_2 = S_1 * \sin \varphi_1 = S_2 * \sin \varphi_2$

Nb : Le rendement d'un transformateur parfait est égal à 1 (pas de pertes)

Les puissances absorbées par le primaire seront absorbées par la charge connectée au secondaire

I.2.1 Transformateur monophasé parfait à vide :

La charge est nul, Lorsque le transformateur fonctionne à vide voir la figure ci-dessous (Figure I.6), l'enroulement secondaire est en circuit ouvert, ce qui signifie qu'il n'y a pas de charge du côté secondaire

et que, par conséquent, le courant dans le secondaire sera nul, alors que l'enroulement primaire supporte un

faible courant I_0 appelé courant à vide qui représente 2 à 10% de courant nominal.

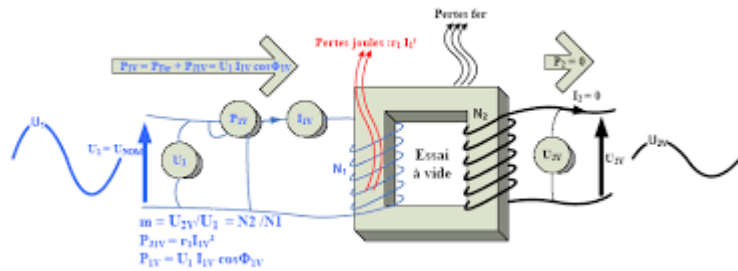


Figure I. 8 : Transformateur monophasé parfait à vide

Ce courant est responsable de l'alimentation des pertes en fer (pertes par hystérésis et par courants de Foucault) et d'une très faible quantité de pertes en cuivre dans l'enroulement primaire. L'angle de retard dépend des pertes dans le transformateur.

Le facteur de puissance est très faible et varie de 0,1 à 0,15 [9].

On peut obtenir une relation suivante dans ce cas :

A vide on a $\Re = 0$ avec $N_1 * I_1 = \varphi * \Re = 0 \Rightarrow \varphi \neq 0$ et $e_1 \approx 0$

$$V_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt} \Rightarrow \varphi = \frac{1}{N_1} \int V_1 dt \quad \varphi_{t2} = N_2 * \varphi = N_2 \left\langle \frac{1}{N_1} * \int V_1 dt \right\rangle \quad (\varphi_{tn} \text{ proportionnel au } N_2)$$

D'après la loi de Faraday on aura :

$$e_2 = \frac{d\varphi_t}{dt} = \frac{N_2}{N_1} * \frac{d}{dt} \left(\int V_1 dt \right)$$

$$e_1 = \frac{d\varphi_t}{dt} = \frac{d}{dt} \left(N * \frac{1}{N_1} \int V_1 dt \right) = V_2$$

On aura donc :

$$m = \frac{N_2}{N_1} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{e_2}{e_1}$$

(*m est rapport de transformation*)

I.2.2 Transformateur monophasé parfait en charge :

On branche une charge au secondaire, avec une source comme représente la figure ci-dessous [9] :

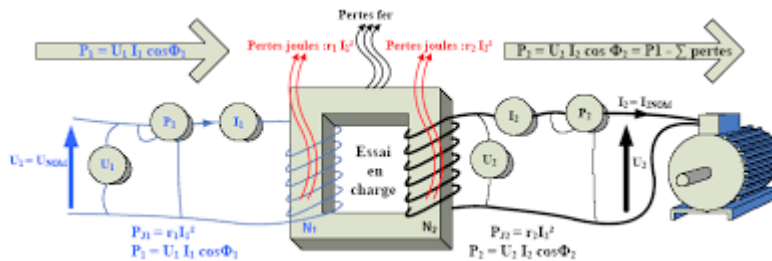


Figure I. 9 : Transformateur monophasé en charge

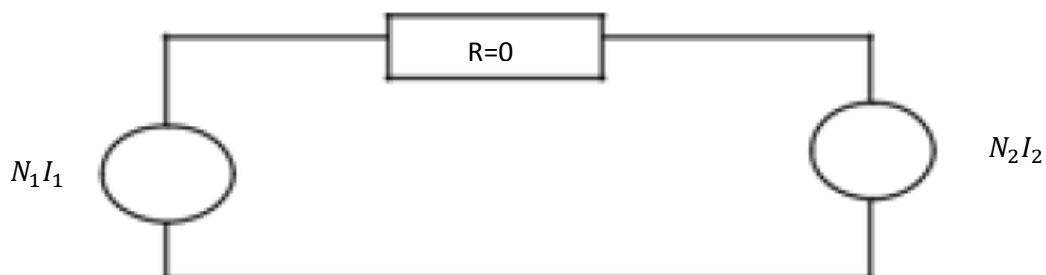


Figure I. 10 : Circuit magnétique équivalent

On a dans ce cas :

$$\mathfrak{R} \text{ a l'infini} \Rightarrow N_1 * I_1 - N_2 * I_2 = \mathfrak{R} * \varphi = 0$$

On aura par la suite $\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{m}$

Alors : $P_1 = P_2 = V_1 * I_1 = V_2 * I_2$

I.3 Transformateur monophasé réel

Dans le cas de transformateur monophasé $P_2 < P_1$ et le rendement < 1 à cause de la présence des pertes. Alors dans un transformateur réel.

On tient compte des résistances des enroulements primaires et secondaires R_1 et R_2 et les inductances de fuites L_1 et L_2 des bobinages. De R_f et L_m la résistance équivalente aux pertes fer et l'inductance magnétisante vue du primaire. Le schéma équivalent du transformateur réel est représenté sur la figure ci-dessous [10] [11]:

I.3.1 Transformateur monophasé réel essai à vide

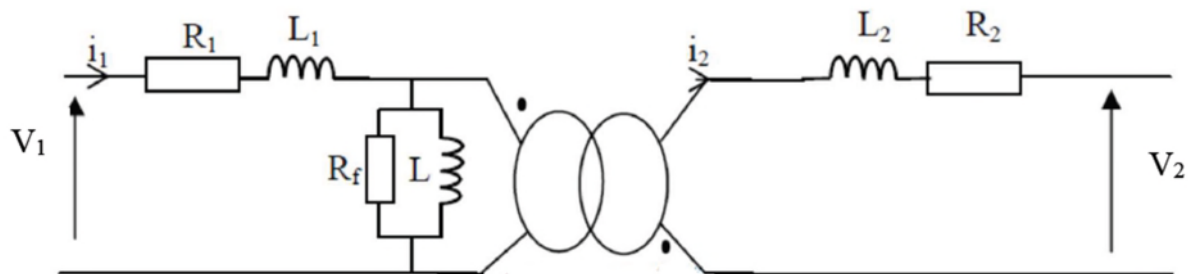


Figure I. 11 : schéma équivalent du transformateur réel

Le circuit primaire d'un transformateur dont le secondaire est en circuit ouvert $I_2 = 0$ se comporte comme une bobine à noyau de fer. En faisant l'hypothèse d'un courant primaire sinusoïdal, on peut montrer que le schéma électrique équivalent est celui de la Figure I.10 où R_μ et L_μ permettent de tenir compte des phénomènes d'hystérésis et de la présence des courants de Foucault [12].

Un courant I_{10} non-nul circule ainsi dans le circuit primaire lorsqu'une tension U_1 lui est appliquée, et ce lorsque $I_2 = 0$. Ce courant I_{10} contribue à ce que l'on appelle les Pertes de Fer P_{fer} .

Dans ce cas on mesure :

- Les pertes fer P_f
- Le rapport de transformation m
- La branche Magnétisante $R_f(R_\mu)$ et X_m

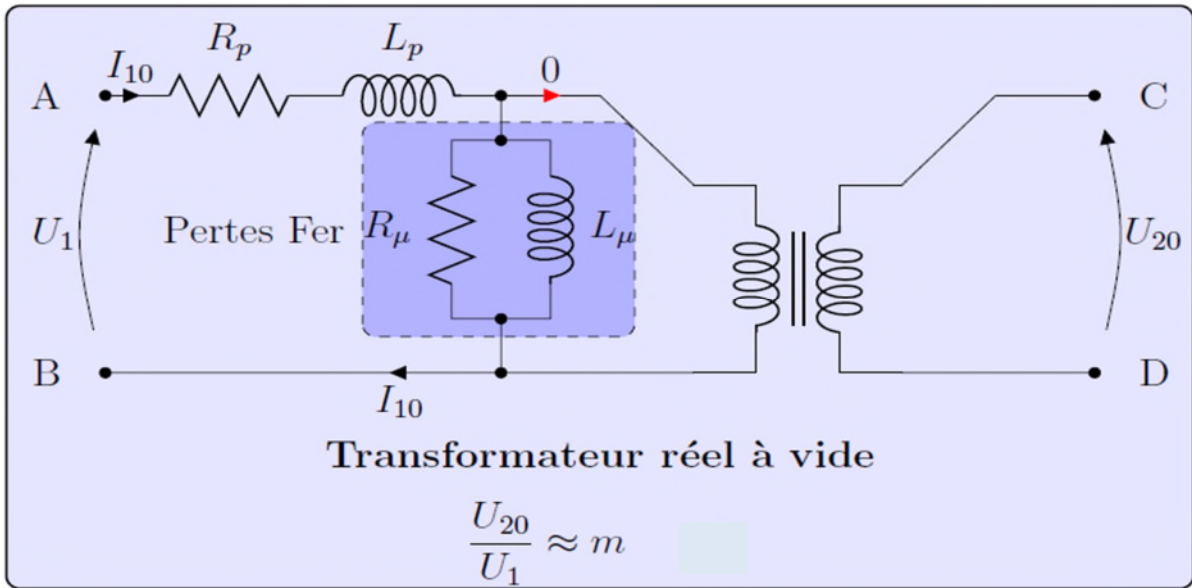


Figure I. 12 : Transformateur monophasé réel à vide

On mesure la puissance primaire à vide P_1 :

$$P_1 = P_{fer} + P_j + P_2 \quad \text{A vide on a : } P_2 = 0 \text{ W et } P_j = R_1 * I_{10}^2 + 0$$

On a $I_{10} \rightarrow 0$ et $I_2 = 0$ Alors $P_{10} = P_{fer}$

- $R_f : P_{10} = R_f * I_{10a}^2 \Rightarrow P_f = \frac{V_1^2}{R_f} \Rightarrow R_f = \frac{V_1^2}{P_{10}}$ Avec $I_{10} \simeq \frac{V_1}{R_f}$
- $X_m : Q_{10} = P_{10} * tg\varphi_0 = X_m * I_{10r}^2 \Rightarrow X_m = \frac{V_1^2}{Q_{10}}$ Avec $I_{10} \simeq \frac{V_1}{X_m}$
- $\cos \varphi_{10} : P_{10} = V_1 * I_{10} * \cos \varphi_{10} \Rightarrow \cos \varphi_{10} = \frac{P_{10}}{V_1 * I_{10}}$

Avec $\cos \varphi_{10}$: est facteur de puissance.

I.3.2 Transformateur monophasé réel en charge :

Lorsqu'un courant I_2 non-nul circule dans le secondaire, celui-ci crée un champ magnétique qui se couple avec le circuit primaire. Au schéma équivalent du transformateur à vide vient s'ajouter l'influence des éléments du secondaire. Le circuit équivalent est celui de la (Figure I.11). Le courant correspondant aux pertes fer I_μ a tendance à saturer et correspond approximativement à celui mesuré lorsque le secondaire est ouvert ($I_\mu = I_{10}$) [12].

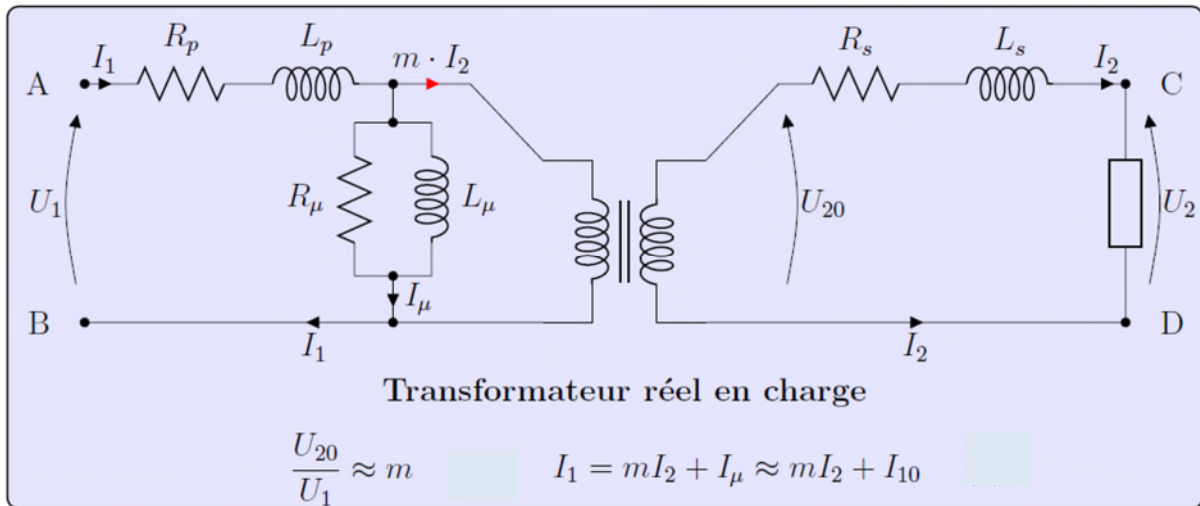


Figure I. 13 : Transformateur monophasé réel en charge

I.3.3 Essai en court-circuit :

On a comme objectif de mesurer [8] :

- Les pertes joules PJ
- Le rapport de transformation m

Mettre V_{1cc} réduite, de façon $I_{2cc}=I_{2n}$. Le wattmètre mesure P_{1cc} la puissance absorbée en court-circuit par le transformateur monophasé voir la figure ci-dessous.

$$P_{1cc} = P_{fer} + P_j + P_2$$

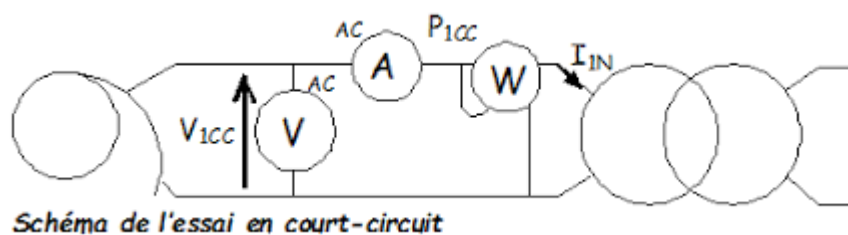
On a : $V_2 = 0 V \Rightarrow P_2 = 0 W$

On aura par la suite une tension primaire réduite :

$$V_{1cc} \ll V_{1N}$$

Tant que P_{fer} proportionnelles a V_1^2 :

$$P_{1cc} = P_j \quad \text{et} \quad m = \frac{I_{2cc}}{I_{1cc}}$$



I.3.4 Circuit simplifié dans l'hypothèse de Kapp :

Les tensions primaire et secondaire à vide sont proportionnelles, elles sont dans le rapport de transformation m . En ce qui concerne les courants, le courant I_μ intervient. Cependant, ce courant est en général négligeable. L'hypothèse de Kapp revient à négliger ce courant, si bien que les courants I_1 et I_2 sont également proportionnels (le rapport de proportionnalité étant m).

De plus, il est possible encore de simplifier le schéma du transformateur en ramenant tous les défauts à un circuit RL série au secondaire.

Dans ce cas, on peut montrer que le secondaire se comporte comme une source de tension de f.e.m. $U_{20} = m.U_1$ en série avec une résistance $R_2 = R_s + m^2.R_p$ et une inductance $L_2 = L_s + m^2.L_p$ [Fig.I.14][12].

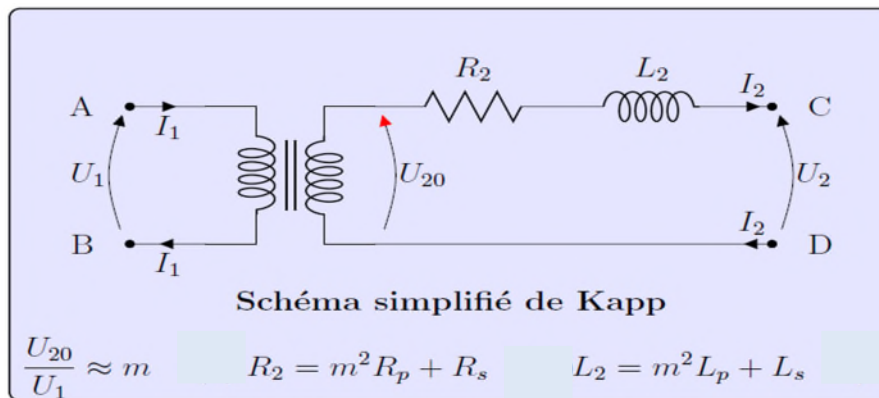


Figure I. 14 : Circuit simplifié dans l'hypothèse de Kapp

$X_1 = L_1 * \omega$: Réactance de fuites au primaire

$X_2 = L_2 * \omega$: Réactance de fuites au secondaire

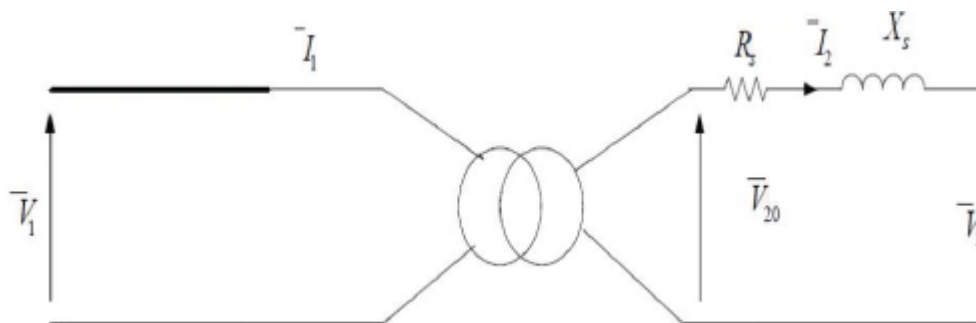


Figure I. 15 : Schéma équivalent ramené au secondaire

Pour ramener au secondaire la résistance et la réactance en la multipliant par m_2

Alors on aura :

La résistance du transformateur ;

$$R_s = R_2 + m^2 * R_1$$

La réactance de fuites magnétiques ;

$$X_s = X_2 + m^2 * X_1$$

1. En cas de court-circuit [8]:

On a :

$$P_{1cc} = R_1 * I_{1cc}^2 + R_2 * I_{2cc}^2 \quad \text{Avec } P_{fer} = 0 \quad \text{et} \quad I_{1cc} = m * I_{2cc}$$

$$\Rightarrow (m^2 * R_1 + R_2) * I_{2cc}^2$$

Donc :

$$Z_s = m * \frac{V_{1cc}}{I_{2cc}}$$

$$R_2 = \frac{P_{1cc}}{I_{2cc}^2}$$

Avec :

$$Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} \Rightarrow X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2}$$

I.4 Types de transformateur :

Il y a plusieurs types de transformateur utilisé dans le système d'alimentation électrique pour différents telles que la production, la distribution, la transmission et l'utilisation de l'énergie électrique. Les différents types de transformateurs sont : transformateur élévateur et Intensifier et abaisser le transformateur, transformateur de puissance, transformateur de distribution, transformateur d'instrument comprenant transformateur de courant et de potentiel, transformateur monophasé et triphasé...

I.4.1 Intensifier et abaisser le transformateur :

A base d'un nombre de tours dans les enroulements primaire et secondaire et de la force électromotrice induite.

Transformateur élévateur transforme une basse tension, Courant alternatif élevé dans un système alternatif haute tension et courant faible Dans ce type de transformateur, le nombre de tours dans l'enroulement secondaire est supérieur au nombre de tours dans l'enroulement primaire. Si ($V_2 > V_1$) la tension est augmentée du côté de la sortie et est appelée transformateur élévateur. Transformateur abaisseur convertit un primaire élevé tension associée au faible courant dans une basse tension, un courant élevé. Avec ce type de transformateur, le nombre de tours dans l'enroulement primaire est supérieur au nombre de tours dans l'enroulement secondaire. Si ($V_2 < V_1$) le niveau de tension est abaissé du côté sortie et est appelé transformateur abaisseur.

I.4.2 Transformateur de puissance :

Les transformateurs de puissance sont utilisés dans le réseau de transmission de tensions plus élevées et est par induction électromagnétique, transforme un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et courant de valeurs généralement différentes, à la même fréquence, dans le but de transmettre la puissance électrique. Les caractéristiques nominales du transformateur de puissance sont les suivantes : 400 KV, 200 KV, 110 KV, 66 KV et 33 KV. Ils sont principalement évalués au-dessus de 200 MVA. Principalement installé dans les centrales et les sous-stations de transport. Ils sont conçus pour une efficacité maximale de 100%. Leur taille est supérieure à celle d'un transformateur de distribution

I.4.3 Transformateur de distribution :

Ce type de transformateur a des cotes inférieures comme 11 KV, 6,6 KV, 3,3 KV, 440 V et 230 V. Ils ont une capacité nominale inférieure à 200 MVA et sont utilisés dans le réseau de distribution pour transformer la tension dans le réseau électrique en abaissant le niveau de tension où l'énergie électrique est distribuée et utilisée. Du côté du consommateur. L'enroulement primaire du transformateur de distribution est enroulé par un fil de cuivre ou d'aluminium revêtu d'email. Un ruban épais en aluminium et en cuivre est utilisé pour faire du secondaire du transformateur un enroulement à haute intensité et basse tension. Le papier imprégné de résine et l'huile sont utilisés pour l'isolation [13].

L'huile dans le transformateur est utilisée pour :

- ✓ Refroidissement
- ✓ Isoler les enroulements
- ✓ Protéger de l'humidité

I.4.4 Transformateur d'instrument de courant :

Le transformateur de courant est utilisé pour mesurer et aussi pour la protection. Lorsque le courant dans le circuit est élevé pour être appliqué directement à l'instrument de mesure, le transformateur de courant est utilisé pour transformer le courant élevé en la valeur souhaitée du courant requis dans le circuit.

I.4.5 Transformateur d'instrument de potentiel :

Le transformateur de potentiel est également appelé transformateur de tension. L'enroulement primaire est connecté sur la ligne à haute tension dont la tension doit être mesurée, et tous les instruments de mesure et les compteurs sont connectés au côté secondaire du transformateur. La fonction principale du transformateur de potentiel consiste à abaisser le niveau de tension jusqu'à une limite ou valeur sûre. L'enroulement primaire du transformateur de potentiel est mis à la terre ou mis à la terre à titre de point de sécurité [13].

Les différents types de transformateur de potentiel sont illustrés ci-dessous :

- ✓ Electromagnétique (c'est un transformateur à fil)
- ✓ Condensateur (le transformateur de tension de condensateur CVT utilise un diviseur de tension de condensateur)
- ✓ Optique (fonctionne sur la propriété électrique si les matériaux optiques)

I.4.6 Transformateur monophasé :

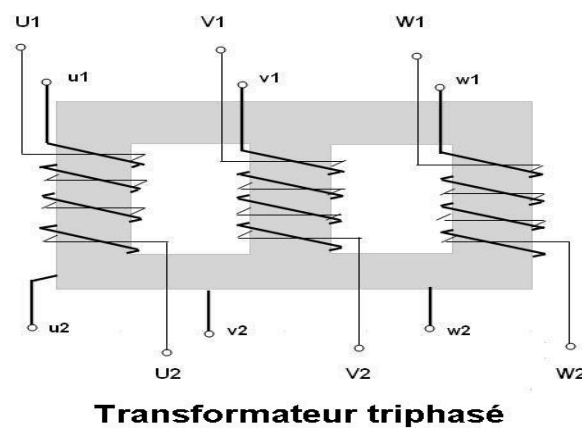
Un transformateur monophasé est un appareil statique, travaille sur le principe de la loi de Faraday sur l'induction mutuelle. À un niveau constant de fréquence et de variation de niveau de tension, le transformateur transfère le courant alternatif d'un circuit à l'autre. Il existe deux types d'enroulements dans le transformateur. L'enroulement auquel est fournie l'alimentation en courant alternatif est appelé enroulement primaire et dans l'enroulement secondaire, la charge est connectée. Le transformateur monophasé est constitué :

- ✓ Circuit magnétique fermé
- ✓ Deux circuits électriques sans liaison entre eux, enroulés autour du circuit magnétique

I.4.7 Transformateur triphasé :

Si le transformateur triphasé est pris et reliés ensemble avec leurs trois enroulements primaires connectés ensemble comme un et tous les trois enroulements secondaires voir la figure ci-dessous, formant comme un enroulement secondaire, le transformateur est censé se comporter comme un transformateur triphasé, c'est-à-dire un banc de trois transformateurs de phase connecté ensemble qui agit comme un transformateur triphasé, autrement Le circuit magnétique d'un tel transformateur comporte ordinairement trois colonnes disposées dans un même plan. Chaque colonne porte un enroulement primaire et un enroulement secondaire et peut être considérée comme un transformateur monophasé. Les trois enroulements, primaires et secondaires, sont connectés en étoile, en triangle...

L'alimentation triphasée est principalement utilisée pour l'électricité production, transmission et distribution d'électricité à usage industriel. Il est moins coûteux d'assembler trois transformateurs monophasés pour former un transformateur triphasé que d'acheter un seul transformateur triphasé [13].



I.5 Etude comparative avec et sans le phénomène de saturation :

I.5.1 Sans la saturation :

Sans saturation la réluctance \mathcal{R} des circuits magnétiques est considérée comme constante. Si le phénomène de saturation est pris en compte, la modélisation du système doit

s'effectuer en établissant une relation entre l'induction magnétique B et le champ H ; par suite \mathcal{R} varie et dépend de la saturation, donc du flux instantané[13].

I.5.2 Avec saturation :

Le comportement non linéaire dû principalement à la caractéristique de l'inductance. Lorsque le fonctionnement du transformateur se situe dans la zone linéaire voir la figure I.14. Et la saturation donnée par une courbe du flux dans le noyau en fonction du courant magnétisant est représentée par une inductance non-linéaire, Dès lors qu'il est impossible de négliger la saturation magnétique dans un circuit, il est important d'écarter les relations qui ne sont propres qu'au régime linéaire. Les seules relations qu'il est toujours possible d'utiliser sont : Le théorème d'Ampère : $H \cdot L = NI$ et la relation : $\Phi = BS$ En revanche, il est nécessaire d'écrire : $B = \mu(H)$. En pratique, à excitation magnétique H donnée, on va se référer à la courbe d'aimantation $B(H)$ du matériau pour y faire correspondre la valeur de l'induction B . De façon plus commune, on se réfère préférentiellement à la courbe $\Phi(I)$, qui possède la même allure que la courbe $B(H)$, et dont on présente un exemple sur la figure ci-dessous :

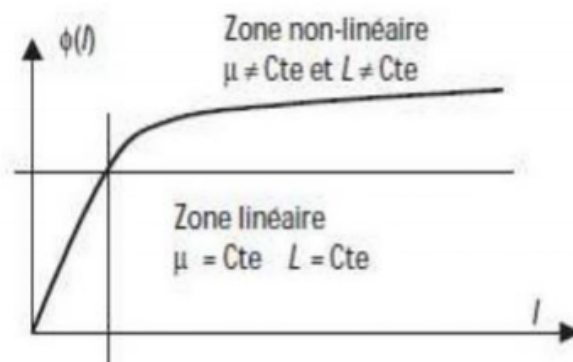


Figure I. 16 : Schéma représente la zone linéaire et non linéaire de la courbe $\Phi(I)$

Conclusion

Dans ce chapitre on a évoqué les deux parties essentielles des transformateurs (partie active et partie constructive) et le principe de fonctionnement des transformateurs en général, et sur les différents pertes peut se provoquer en utilisation et les méthodes sur lesquelles on protège la machine et la manière de refroidissement de transformateur en cas d'échauffement. Ensuite on a passé en revue les transformateurs monophasés réels et parfait en état de charge et à vide, j'ai terminé mon chapitre par les différents types de transformateurs et d'une étude comparative sur le phénomène de saturation magnétique.

A decorative graphic of a scroll with a light blue border and rounded corners. The scroll is partially unrolled, with the top and bottom edges curving upwards. The text is centered within the scroll.

Chapitre II
Calcul thermique d'un
transformateur monophasé

II. Calcul thermique d'un transformateur :

II.1 Introduction :

Essentiellement le transformateur est constitué de circuit magnétique en fer canalisant le flux magnétique, circuit électrique en cuivre canalisant les courants avec les isolants en papier presspahn.

Lors de son fonctionnement une fraction de la puissance active reçue par le transformateur passe sous la forme calorifique dans le fer, par hystérésis et par courants de Foucault, dans le cuivre par effet joule et dans les isolants en papier presspahn par pertes diélectriques [16].

Ces pertes qui se dégagent dans le noyau et dans les enroulements sont transformées en énergie thermique et provoquent l'échauffement des parties correspondantes du transformateur. La dispersion de l'énergie thermique sous forme de chaleur a lieu par conduction, par rayonnement et par convection [16] [17].

En citant aussi dans ce chapitre la modélisation thermique des composants et convertisseurs (transformateur) est indispensable au bon fonctionnement de ces derniers. En effet, elle permet l'étude des performances thermiques des composants et des convertisseurs en vue de préserver leur intégrité. Présentera en détails les différentes pertes cuivre et fer dans les composants magnétiques en hautes fréquences [19].

II.2 Description des problèmes thermiques dans transformateur :

Dans les transformateurs, Les différentes pertes sont les sources de chaleur dont la dissipation est régie par trois modes de transmissions par conduction, rayonnement et par convection. La température du point chaud limite la puissance du transformateur. Donc la connaissance précise des températures atteintes dans le transformateur, et plus particulièrement celle atteinte par le point le plus chaud des bobinages nous permet de fiabiliser et d'évaluer cette température pour maîtriser les échauffements bien sûr par l'intervention des systèmes de refroidissement.

Pour une technologie donnée, chaque constructeur a développé des méthodes de calcul théoriques et empiriques pour déterminer non seulement les échauffements moyens d'huile et de cuivre, mais aussi pour évaluer le point le plus chaud des bobinages[23].

Pour agir sur les performances d'échauffement des transformateurs de grande puissance, la question est d'assurer un passage suffisant d'huile au niveau de toutes les parties du circuit magnétique et des bobinages. Diverses techniques bien connues sont optimisées par les constructeurs depuis longtemps [23] :

- Canaux de refroidissement des bobinages et si besoin, du circuit magnétique
- Circulation forcée et/ou dirigée de l'huile pour améliorer les échanges thermiques entre les bobinages et l'huile
- Circulation zigzag de l'huile en ONAN (pour les transformateurs de type colonne avec enroulements en galettes) ...etc.

II.2.1 Modèle thermique :

Le modèle thermique est volontairement simple. Il ne prend en compte que la convection et ne fournit que la température moyenne de fonctionnement. Les pertes fer étant limitées par une valeur de perte volumique afin de garantir leur évacuation, il en résulte que seules les pertes Joules viennent alimenter le modèle thermique. Ce modèle étant fortement lié à la topologie du transformateur, il en découle que son adaptation à un modèle double tore impose de faire de fortes approximations de par la difficulté, entre autres, d'y intégrer un canal de ventilation. En convection, l'élévation de température ΔT est définie par l'équation :

$$\Delta T = \frac{P}{\alpha * S}$$

Avec :

P : Pertes cuivre (W)

α : Transmissibilité thermique surfacique ($Wm^{-2}.k^{-1}$)

S : La surface de convection (m^2)

II.3 Description du logiciel FEMM (Finite Element Method Magnetics):

C'est un logiciel de modélisation par la méthode des éléments finis 2D cartésien et 2D axisymétrique dédié à la résolution de problèmes électromagnétiques dans le domaine des basses fréquences.

Un module "Préprocesseur et Post processeur". Ce module permet, au travers d'une interface graphique, la saisie de la géométrie et la définition du problème en vue de sa résolution par la méthode des éléments finis. La saisie de la géométrie peut se faire avec la définition de points clefs que l'on relie pour former des régions ou par l'importation de structures AUTOCAD au

format DXF. Ce module intègre également des outils de post-traitement : visualisation et différents calculs inhérents au problème (inductance, flux, pertes Joule, etc...)

Un module de maillage qui permet d'obtenir une triangulation de chaque région du domaine de calcul.

Un module de résolution par éléments finis : ce solveur 2D cartésien et axisymétrique permet de résoudre des problèmes d'électrostatique linéaires, de magnétostatique linéaires et non linéaires, de magnétodynamique en régime harmonique linéaires et non linéaires et de thermique en stationnaire.

Il peut être utilisé sans interface graphique au travers du langage script "LUA". Ce logiciel est dédié aux problématiques du génie électrique : ses menus utilisent le vocabulaire du domaine et il possède un ensemble de pré et de post-traitement dédié à ces problématiques (introduction de la courbe $B(H)$ pour les matériaux magnétiques non linéaires, conditions de périodicité, calcul des pertes par effet Joule, visualisation des champs électromagnétiques, calcul de forces électromagnétiques). Il est possible de mettre en place un couplage magnétique thermique via le langage script LUA.

II.3.1 Modélisation par éléments finis avec logiciel FEMM :

Ce logiciel nous permet d'évaluer des niveaux de saturation et d'analyser la répartition du flux dans les différentes parties du circuit magnétique.

L'optimisation des dimensions géométriques de la machine ainsi que la prédiction précise de son fonctionnement exige la connaissance de la répartition du champ magnétique dans toutes les régions actives de la machine. Également, le calcul du champ magnétique est le moyen le plus précis pour la détermination des paramètres électromagnétiques des machines en fonctionnement non linéaire. Pour cette raison, il est indispensable d'employer une méthode numérique, capable de fournir une précision élevée dans le calcul du champ avec le moins d'équations possibles, tel que la plus performante est la méthode des éléments finis **MEF**. Pour plusieurs combinaisons de courants d'excitation et des positions angulaires du rotor on est amené à calculer le champ magnétique. Plusieurs logiciels de modélisation sont basés sur le principe de la **MEF** tel que le "**FEMM**".

II.3.2 Choix et méthode d'étude :

La méthode analytique permet d'exprimer les principes physiques mis en jeu lors de la conversion magnétique ou thermique, sous forme de relations analytiques. Les résultats obtenus sont approchés par la simplification des hypothèses de travail, nécessaire pour le calcul, ce qui pénalise limite la précision. De plus, pour choisir ces hypothèses, il est souvent nécessaire de connaître à l'avance les interactions entre les différents constituants.

La résolution de l'équation par des méthodes analytiques est impossible du fait de la géométrie complexe des machines et des propriétés non linéaires des matériaux magnétiques les constituant. Seules les méthodes numériques peuvent être utilisées. Le domaine d'étude est alors discrétisé en un nombre finis de points [16].

II.3.3 Domaine "Magnétique", Modèles Electromagnétiques :

L'étude phénoménologique de ces problèmes nous conduit à étudier l'interaction entre les ondes électromagnétiques et le transfert de chaleur au sein du transformateur. Nous présenterons, dans ce chapitre, les bases mathématiques des équations électromagnétiques et magnétique. Différentes formulations ont été élaborées dans la littérature pour résoudre ces équations. Parmi ces formulations, nous exposerons celles qui sont les mieux adaptées à la modélisation des transformateurs.

Ces modèles décrivent les lois et le formalisme de l'interaction entre les ondes électromagnétiques et le matériau. Ce formalisme conduit souvent à des équations aux dérivées partielles nécessitant une méthode de résolution numérique.

II.3.3.1 Les équations de Maxwell :

Les équations de Maxwell décrivent le comportement du domaine magnétique pour des géométries et des conditions variées. Maxwell fut le premier à écrire le comportement magnétique sous forme d'équations différentielles partielles. Celles-ci peuvent s'écrire sous la forme suivante :

Equation d'Ampère :

$$\nabla * H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$$

Equation de Faraday :

$$\nabla * E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

Equation de conservation du flux magnétique :

$$\nabla * B = 0$$

Equation de Gauss : Conservation de charge électrique :

$$\nabla * D = \rho_e$$

Si la densité de charge ρ_e est nulle, l'équation (II.4) est remplacée par la loi de conservation de courant exprimée par :

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$$

Avec :

H : Champ magnétique ($A.m^{-1}$)

E : Champ électrique ($V.m^{-1}$)

B : Induction magnétique (T)

D : Induction électrique ($C.m^{-2}$)

J : Densité de courant ($A.m^{-2}$)

Ω : Densité volumique de charge ($C.m^{-3}$)

Le domaine fréquentiel des composants magnétiques étudié étant fortement limité, le terme $\frac{\partial D}{\partial t}$ peut être négligé. En effet dans cette plage de fréquence, les courants de déplacement sont très faibles. Il devient par contre primordial de les prendre en compte dans les cas d'étude de filtres hautes fréquences ou de problématiques. Les équations de Maxwell se simplifient alors et donnent les équations de la magnétodynamique :

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} H &= J \\ \operatorname{rot} E &= -\frac{\partial D}{\partial t} \\ \operatorname{div} B &= 0 \\ \operatorname{div} J &= 0 \end{aligned}$$

II.3.3.2 Relations Constitutives des Matériaux :

En considérant que les champs varient lentement dans le temps, ces relations se limitent aux premiers termes de leurs développements respectifs en série de Taylor.

$$D = E * \varepsilon = \varepsilon_0 * \varepsilon_r * E$$

$$B = \mu * H + B_r = \mu_0 * \mu_r * H + B_r$$

$$J = E * \sigma + J_0 + \varepsilon * \frac{\partial E}{\partial t}$$

ε, μ, σ Représente respectivement la permittivité électrique, la perméabilité magnétique et la conductivité électrique du matériau. B_r Re présente l'induction rémanente due au cycle d'hystérésis et sera négligée de par la nature "douce" du matériau ferromagnétique utilisé dans les transformateurs. J_0 Est la densité de courante source.

Les équations de Maxwell sont générales et ne prennent pas en compte les caractéristiques du matériau. Celles-ci doivent être complétées par des lois comportementales du matériau qui sont aux nombres de trois :

$$D = E * \varepsilon$$

$$B = \mu * H$$

$$J = E * \sigma$$

II.3.4 Les méthodes numériques

Nous distinguons deux techniques principales de résolution des équations des champs électromagnétiques :

- **Par Différences finies (D.F) :** le maillage est, souvent, un quadrillage rectangulaire sur les nœuds pour lesquels est effectuée la discrétisation de l'équation différentielle associée à la décomposition en série de Taylor du potentiel scalaire.

- **Par Eléments Finis (E.F)** : autorisent l'emploi d'éléments de toute forme à l'intérieur desquels le potentiel est approché par un polynôme ; la résolution se ramène à la minimisation d'une fonctionnelle liée à l'énergie emmagasinée dans les éléments.

La méthode des éléments finis permet de représenter finement les différentes grandeurs dans le système. Cependant, les résultats obtenus restent « gourmands » en ressources informatiques, et ne peuvent donc pas être directement exploités dans les structures actuelles de commande ou de diagnostic. La détermination des champs électromagnétiques est d'un grand intérêt pour la conception des machines électriques. L'analyse de ces phénomènes électromagnétiques est basée sur la résolution des équations de Maxwell dont la complexité est telle qu'elle est exclue dans la plupart des cas du formalisme analytique [19].

Dans le cas thermique la Méthode des Eléments Finis (FEM) permet de résoudre numériquement l'équation de la chaleur (voir au-dessous) qui modélise les phénomènes de conduction thermique dans les solides uniquement. La résolution du problème se base sur un maillage du composant étudié en tenant compte des conditions aux limites (CL) sur les frontières du système. Ces CL permettent de modéliser les échanges convectifs ou radiatifs avec l'environnement [19]. La Figure suivante présente un exemple de maillage éléments finis dans le cas d'une pièce métallique.

L'équation de la chaleur :

$$\rho * C_p * \frac{\partial T}{\partial t} = q_g * \Delta T$$

II.4 Transferts thermique :

L'étude des transferts thermiques permet de caractériser les échanges d'énergie thermiques entre les systèmes thermodynamiques. Ce type d'étude fait intervenir plusieurs disciplines de la physique : la mécanique, la mécanique des fluides et la thermodynamique. Un certain nombre de ses lois sont établies d'une façon empirique à partir de l'observation de phénomènes physiques et de mesures expérimentales

II.4.1 Modes de transfert thermique :

Les trois modes de transfert de chaleur à considérer que j'ai déjà cité au début de ce deuxième chapitre sont la conduction thermique, la convection thermique et le rayonnement [19] [21].

1. Conduction thermique :

Le transfert de chaleur par conduction s'effectue au sein d'un milieu solide opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. Cette propagation de chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou des molécules, et une transmission par mouvement des électrons libres. La conduction thermique dans le cas d'un matériau isotrope et homogène est décrite par la loi de Fourier. Cette loi affirme que la densité de flux de chaleur φ est proportionnelle à la variation de température. La Figure II.1 présente l'exemple d'un transfert de chaleur unidirectionnel dans un solide, entre deux faces de températures différentes T_1 et T_2 tel que $T_1 > T_2$. Le sens du transfert thermique se fait toujours de la température chaude vers la température froide. Cette propriété se traduit par un signe moins dans l'expression de la loi de Fourier.

$$\varphi = -\lambda * \frac{dt}{dx}$$

Avec :

λ : La conductivité thermique du matériau en [W. m⁻¹. K⁻¹]

φ : La densité de flux de la chaleur [W. m⁻²]

T : La température [K]

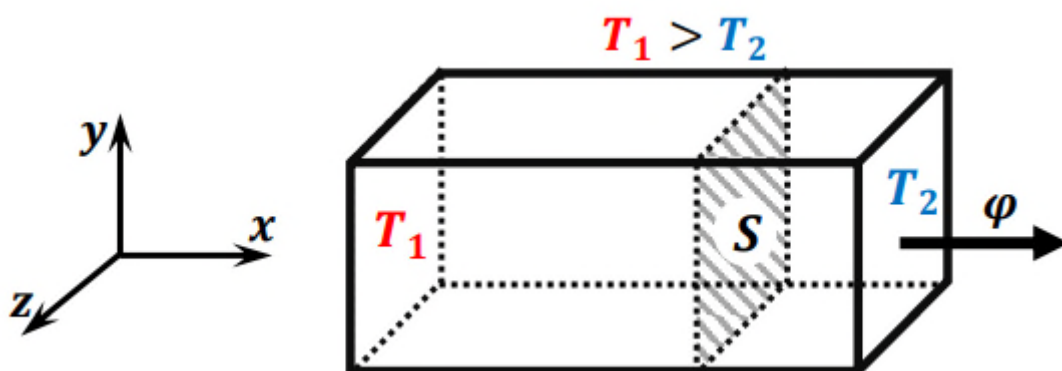


Figure II. 1 : Conduction thermique dans un solide sous une différence de température

La loi de Fourier peut être généralisée pour un transfert de chaleur tri-directionnel :

$$\varphi = -\lambda * \text{grad}T$$

2. Convection thermique :

La convection thermique correspond au transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par le déplacement du fluide. Si la conduction thermique suppose la non-déformation de la matière pendant le transfert thermique, ce qui donne lieu à des échanges d'énergie purement thermiques, la convection est le résultat du mouvement d'un fluide, ce qui nécessite de prendre en compte l'énergie mécanique du fluide dans le bilan énergétique [22].

Un échange convectif est caractérisé par trois équations, appelées les équations de Navier Stokes [22].

La résolution analytique de ce problème de trois équations n'est possible que dans des cas particuliers nécessitant plusieurs hypothèses et simplifications. Face à la difficulté de résolution exacte de ce système d'équation, des méthodes numériques peuvent être utilisées dans le cadre de la mécanique de fluides numérique. Pour s'affranchir du problème de résolution de ces équations, la loi de Newton permet de décrire de manière simple la convection thermique d'une surface avec son environnement (Figure II.2).

Cette loi affirme que le flux thermique par convection est proportionnel à la différence de température entre celle du fluide à l'infini et celle de la surface d'échange. Cette loi est purement comportementale et n'a aucun fondement théorique. Cependant, elle est largement utilisée du fait de sa simplicité.

$$\phi_{conv} = S * h * (T_s - T_{\infty})$$

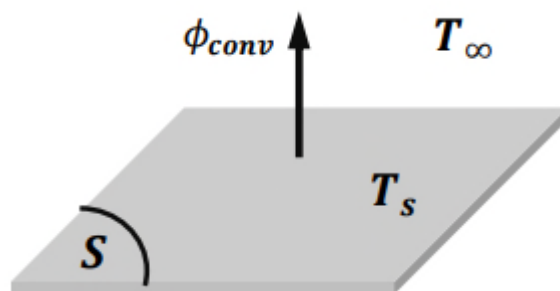


Figure II. 2 : Echange thermique par convection d'une surface avec son extérieure

Avec :

ϕ_{conv} : Flux de chaleur transmis par convection [W]

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection [W m⁻² °C⁻¹]

T_s : Température de surface du solide [°C]

T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide [°C]

S : Aire de la surface de contact solide/fluide [m²]

L'utilisation de cette formule de Newton nécessite de connaître ou d'identifier la valeur du coefficient de convection h . Ce dernier dépend d'un certain nombre de paramètres :

- ✓ Propriétés physiques du fluide et de sa température
- ✓ La nature de l'écoulement
- ✓ Forme géométrique de la face de contact solide-fluide
- ✓ Température de la surface de contact entre le solide et le fluide.

Pour la détermination du coefficient de convection le régime d'écoulement est aussi de première importance. Quelle que soit la nature de la convection, deux régimes d'écoulement peuvent être définis [22] :

Régime laminaire : L'écoulement se fait par couches pratiquement indépendantes d'une façon régulière et dans la même direction.

Régime turbulent : L'écoulement n'est pas unidirectionnel, Seules les deux couches adjacentes aux parois du fluide connaissent un écoulement laminaire.

3. Transfert thermique par rayonnement :

Le transfert thermique par rayonnement est un transfert d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques. Il dépend des propriétés de la surface et de son orientation. Pour une surface S (Figure II.3), l'échange thermique est donné par la loi de Stephan [19]:

$$\phi_{ray} = \varepsilon * \sigma * S * (T_s^4 - T_\infty^4)$$

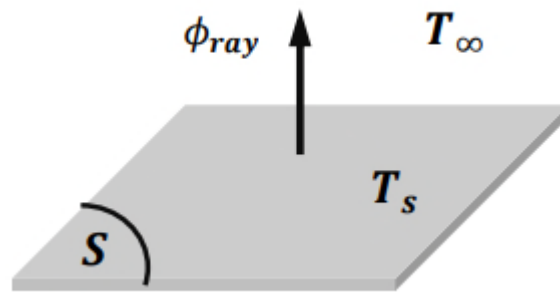


Figure II. 3 : Echange thermique par rayonnement d'une surface avec son extérieur

Avec :

ϕ_{ray} : Flux de chaleur transmis par rayonnement [W]

σ : Constante de Stephan [5,6710-8 W m⁻² K⁻⁴]

ε : Facteur d'émission de la surface

T_s : Température de surface du solide [K]

T_{∞} : Température ambiante [K]

II.4.2 La modélisation thermique :

La modélisation thermique des composants est indispensable au bon fonctionnement de ces derniers. En effet, elle permet l'étude des performances thermiques des composants et des convertisseurs en vue de préserver leur intégrité. Ce type de modélisation est d'autant plus important, à l'heure actuelle, que les challenges de l'EP tournent autour de l'augmentation des densités de puissance [19] et du fonctionnement des convertisseurs dans des environnements sévères, notamment en haute température. Cette problématique se retrouve dans de nombreux domaines d'application tels que le transport, l'aéronautique, le spatial.

L'objectif d'une étude thermique d'un composant est de lui permettre d'accomplir sa fonction, tout en restant en dessous de sa température de fonctionnement maximale et préserver ainsi sa durée de vie, et menée pour deux problématiques bien distinctes : la première est liée au dimensionnement du composant et donc à la détermination des caractéristiques géométriques et des propriétés physiques des éléments le constituant. La seconde permet de déterminer les points de fonctionnement critiques du composant, définissant ainsi la zone limite des grandeurs électriques d'entrées (courant, tension,

fréquences, etc.) permettant de limiter sa température en dessous d'une température maximale.

II.4.3 Définitions des grandeurs :

La quantité de chaleur (q) : est l'énergie thermique transférée pendant un échange thermique. Son unité est le Joule [J].

Le flux de chaleur (ϕ) : est la quantité d'énergie transférée par unité de temps. Ce flux thermique ϕ correspond à une puissance et s'exprime en Watt [W]

$$\phi = \frac{dq}{dt}$$

La densité de flux de chaleur (φ) : correspond au taux de chaleur (énergie thermique) qui traverse une surface donnée S par unité de temps (2-2). Son unité est le $[W \cdot m^{-2}]$

$$\varphi = \frac{1}{S} \frac{dq}{dt} = \frac{\phi}{S}$$

La conductivité thermique (λ) : est la grandeur caractérisant l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur. Plus elle est grande, meilleure est la conduction de la chaleur par ce matériau. Son unité est le $[Wm^{-1}K^{-1}]$.

La chaleur spécifique ou capacité thermique massique (C_p) : est l'énergie thermique nécessaire pour augmenter de $10C$ un kilogramme d'un matériau. Son unité est le $[J \cdot kg^{-1} \cdot K]$.

A base des différentes équations et modes de transfert de chaleur, plusieurs approches de modélisations thermiques peuvent être menées pour un composant donné. Deux familles de modèles, analytique et numérique, peuvent être utilisées avec, dans chacune d'elles, des méthodes particulières.

II.4.3.1 Modèles analytiques :

1. Empirique :

Sont extraits à partir de données expérimentales. Il s'agit essentiellement de donner une expression à la résistance thermique globale (R_{th}) liant l'élévation de température du composant aux pertes totales :

$$\Delta T = R_{th} * P_{total}$$

Ce type de modèle peut se représenter sous la forme d'un circuit équivalent très simple [Fig. II.4].

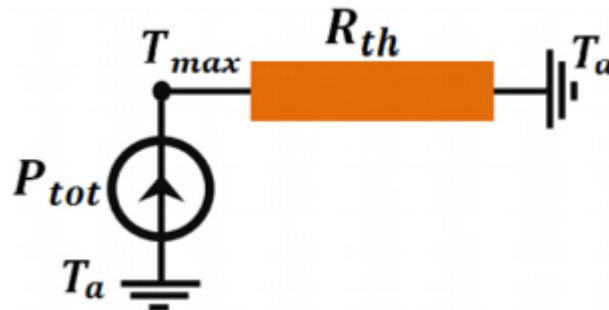


Figure II. 4 : empirique à une résistance thermique équivalente

Les modèles empiriques exploitent donc les résultats de mesures pour donner une expression simple ou des valeurs prédéfinies à la résistance thermique R_{th} , en fonction de paramètres tels que la surface externe d'un composant.

2. Réseau thermique nodal :

Dans ce cas un composant est découpé en plusieurs éléments simples, chacun de ces éléments étant le siège d'un flux thermique unidirectionnel représenté par une résistance thermique [fig.II.5].

Ce type de modèle exploite alors l'analogie thermique-électrique illustrée dans le Tableau II.1. Les sources de chaleurs sont placées aux différents nœuds correspondants. Dans le cas d'un problème dynamique, des capacités thermiques peuvent être ajoutées pour rendre compte de l'évolution temporelle de la température dans les nœuds du composant.

Grandeur	Thermique	Electrique
Flux	Chaleur ϕ en [W]	Courant i en [A]
Différence de potentiel	Différence de Température ΔT en [°C]	Tension U en [V]
Elément dissipatif	Résistance thermique en [°C/W]	Résistance électrique en [Ω]
Elément de stockage	Capacité thermique en [J/°C]	Capacité électrique en [F]

Tableau II. 1 : Analogie thermique-électrique

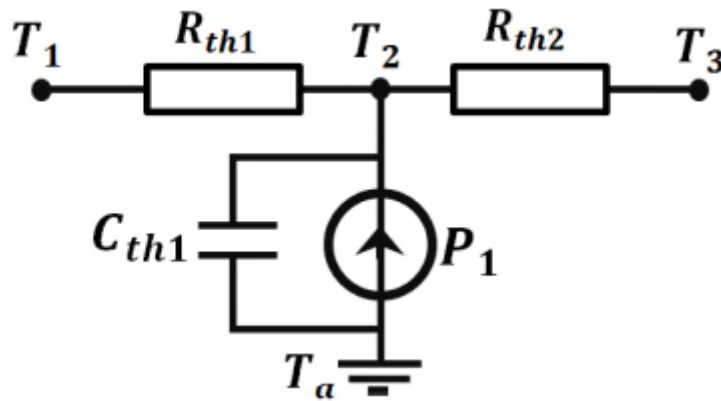


Figure II. 5 : modèle par réseau de résistances thermiques

II.5 Transferts thermique dans le transformateur

Les différents éléments constituant le transformateur, et les phénomènes électromagnétiques, diélectriques, électromécaniques et thermiques ont désormais tous été décrits. On se propose maintenant d'approfondir quelques notions sur la nature des échanges thermiques. On distingue trois modes de transfert de la chaleur : conduction, rayonnement, et convection ; dont les définitions précises on l'a déjà vu dans ce chapitre II, partie Transferts thermique.

L'énergie thermique d'un milieu correspond à l'agitation (ou mouvement désordonné) de ses particules élémentaires (molécules, atomes, électrons ...). Celles-ci, ayant une certaine liberté de mouvement, peuvent échanger tout ou une partie de leur énergie thermique. La température d'un corps représente le potentiel de l'énergie thermique. La répartition des **températures** dans le transformateur décrit son état thermique [24].

La **conduction** correspond à l'interaction directe entre les particules élémentaires voisines. Ce mode d'échange tend à une distribution homogène, au sein du milieu, de l'énergie thermique, par diffusion des zones où la température est élevée vers les zones où elle est plus faible. La conduction se produit dans tous les matériaux du transformateur et aussi dans l'air environnant, dès la mise en route et l'apparition de sources de chaleur dues aux pertes. La direction et l'intensité des échanges thermiques dépendent de la nature des matériaux. On distingue les **milieux homogènes** composés d'un seul matériau des **milieux hétérogènes**. Dans les galettes composées des conducteurs en cuivre et des isolants en papier, la conduction de chaleur est, tout comme celle du courant, plus facile dans le sens des spires [24].

Des échanges de chaleur peuvent également avoir lieu à distance par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques. En effet, les particules élémentaires d'un corps peuvent émettre des

radiations électromagnétiques et perdre de l'énergie thermique, ou peuvent, au contraire, absorber ces radiations en gagnant de l'énergie. Ces phénomènes correspondent au **rayonnement**. Celui-ci peut avoir lieu lorsque les corps sont séparés par un milieu suffisamment transparent pour transmettre les ondes électromagnétiques. Dans le cas du transformateur, il s'agit des échanges entre la cuve ou l'échangeur et l'air extérieur.

Enfin, la **convection** est le mode de transfert thermique résultant du mélange des diverses parties d'un fluide à des températures différentes. A la différence des deux autres, ce phénomène se produit à l'échelle macroscopique, et uniquement dans un fluide, dont les possibilités de déformation confèrent une liberté de mouvement et par là-même une capacité de transporter la chaleur directement. La convection a donc lieu dans l'huile du transformateur, ainsi que dans l'air environnant et l'eau dans le cas d'un hydro réfrigérant [24].

La convection correspond cependant à deux mécanismes physiques distincts :

- 1. Convection forcée :** A lieu lorsque le mouvement du fluide est produit par une action extérieure. C'est le plus souvent le cas dans le transformateur de puissance puisqu'une pompe fait en général circuler l'huile dans la partie active et l'échangeur, et que l'air est souvent ventilé autour du radiateur ou dans l'aéroréfrigérant.
- 2. Convection libre ou naturelle :** Se produit dans le cas où le mouvement du fluide résulte simplement de la différence de densité entre les parties chaudes et froides du fluide. Ce phénomène se produit en particulier dans l'air extérieur à la cuve.

Dans les canaux d'huile du transformateur, la conduction et la convection sont donc couplées. Toutefois on distingue :

- Les zones proches des solides ou couches limites où la vitesse est faible en raison de l'adhérence du fluide aux parois, et où les phénomènes de conduction et de convection sont d'ampleur comparable ;
- Les zones éloignées de la paroi (à partir de 1 mm environ) où la conduction est négligeable devant la convection.

On différencie donc le transfert conducto-convectif à la paroi des solides chauffants (galettes, circuit magnétique, cuve) et le transport convectif dans le fluide. La convection regroupe ces deux phénomènes.

En résumé, le système de refroidissement du transformateur évacue les pertes, sources de chaleur des parties métalliques, par un ensemble de transferts thermiques entre chaque partie chauffante et l'huile d'une part, entre l'huile et l'air ou l'eau de l'échangeur d'autre part.

a. Entre les galettes et l'huile se produisent :

- ❖ La conduction hétérogène dans les spires composées de cuivre et de papier, ainsi que dans les cales, les écrans et l'habillage en carton ;
- ❖ Le transfert conducto-convectif principalement aux surfaces de la galette non couverte de cales, mais également aux autres parois en contact avec l'huile ;
- ❖ Le transport convectif, le plus souvent forcé, de bas en haut, dans l'huile.

b. Entre le circuit magnétique et l'huile ont lieu :

- ❖ La conduction dans le fer,
- ❖ La convection aux parois du circuit en contact avec l'huile.

c. La cuve est concernée par :

- ❖ La conduction dans la cuve et tous les solides en contact,
- ❖ La convection avec l'huile d'un côté et l'air de l'autre,
- ❖ Le rayonnement dans l'air environnant.

d. Dans l'échangeur de chaleur se produisent :

- ❖ La convection dans l'huile,
- ❖ La conduction dans le métal constituant l'échangeur,
- ❖ La convection dans l'air ou l'eau,
- ❖ Le rayonnement dans l'air.

II.6 Différentes pertes dans le transformateur :

Les pertes fer ou les pertes à vide sont localisées dans les tôles du circuit magnétique, elles sont essentiellement les pertes par hystérésis et les pertes par courants de Foucault, leur valeur dépend de la fréquence et de la valeur maximale de l'induction magnétique.

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

Les composants magnétiques n'échappent pas à ces règles. Leur fonctionnement en hautes fréquences est source de pertes dans les conducteurs du bobinage (pertes cuivre) et de pertes dans le matériau magnétiques (pertes fer).

II.6.1 Modèles de Pertes Cuivre :

En basse fréquence (BF), le courant dans un conducteur se répartit uniformément sur toute la section d'un conducteur. Cette répartition correspond à un niveau de pertes minimal dans les conducteurs. Le fonctionnement en haute fréquence des composants magnétiques va engendrer des pertes supplémentaires, liées à des effets haute fréquence, qu'il faut être capable de comprendre et de modéliser.

II.6.1.1 Effets haute fréquence dans les conducteurs :

Pour modéliser ces pertes, il est nécessaire d'analyser les effets HF qui vont modifier la répartition de la densité de courant dans les conducteurs, ainsi que leur impact sur les performances des composants, car en hautes fréquences provoque des effets importants tels que

- **Effet de peau** : est lié à la variation de la profondeur de pénétration du champ d'induction magnétique avec la fréquence. En effet, le courant qui traverse le conducteur crée un champ magnétique qui induit un courant supplémentaire venant s'ajouter au courant initial. Le courant résultant se concentre alors à la périphérie du conducteur, d'où l'apparition de cet effet dit pelliculaire. Pour un conducteur donné, plus la fréquence est élevée, plus l'effet est marqué, le courant se répartissant pratiquement sur une épaisseur appelée épaisseur de peau figure II.6.

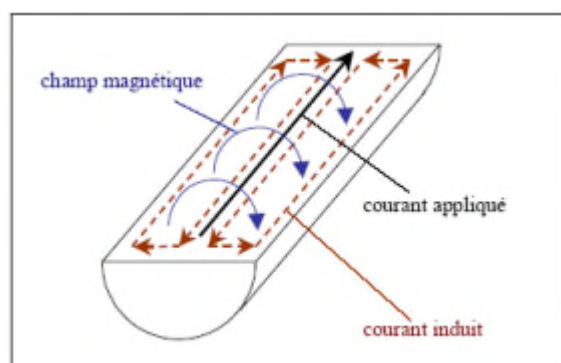


Figure II. 6 : Effet de peau dans un conducteur

- **Effet de proximité** : apparait en présence de plusieurs conducteurs. Lorsqu'un premier conducteur est parcouru par un courant HF, ce dernier génère un champ qui va traverser le ou les conducteurs à proximité et induire des courants qui vont circuler dans ces derniers. Dans les composants magnétiques, cet effet de proximité est bien entendu majoritaire, de par la présence de plusieurs conducteurs, dans une fenêtre de bobinage figure II.7.

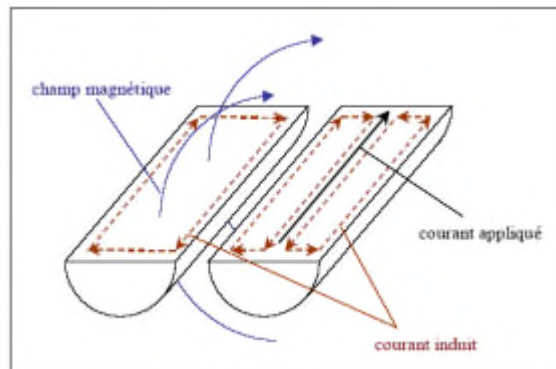


Figure II. 7 : Effet de proximité

II.6.2 Pertes fer dans les noyaux magnétiques :

Le noyau magnétique, quel que soit son matériaux constituant, est siège de pertes fer. Pour des matériaux utilisés en HF, deux critères sont primordiaux pour le choix d'un matériau magnétique : L'induction à saturation et le niveau des pertes volumiques. Pour le 1er critère, plus l'induction sera élevée, plus le nombre de spires pourra être réduit. Les pertes cuivre seront ainsi réduites.

II.6.2.1 Origine des pertes Fer :

Les pertes fer dans les matériaux magnétique proviennent de deux phénomènes principaux. Le premier est lié à l'effet joule et au fait que la conductivité électrique du matériau magnétique est non nul. Le second phénomène est lié à l'hystérésis caractérisant le comportement des matériaux magnétiques. A ces pertes s'ajoutent des pertes supplémentaires dont la détermination reste très complexe [19].

Les ferrites présentent une grande résistivité électrique, ce qui limite leur pertes par effet joules et les rend adaptées aux composants magnétiques en hauts fréquences, et la grande partie des pertes sera plutôt liée à l'effet hystérésis.

1) Pertes par hystérésis :

L'une des principales caractéristiques des matériaux magnétiques est la courbe B-H présentant un phénomène d'hystérésis [19]. Si l'excitation H est assez forte, le matériau magnétique atteint son induction magnétique de saturation B_s . Quand l'excitation revient à zéro, l'induction magnétique ne s'annule pas. Dans ce cas, le matériau magnétique garde une induction magnétique dite résiduelle ou rémanente B_r . Enfin, pour annuler l'induction magnétique il faut appliquer un champ magnétique d'excitation de valeur $\pm H_c$ appelée champ magnétique coercitif comme illustre la figure II.8.

Lorsque le champ magnétique d'excitation H évolue entre les valeurs H_1 et H_2 , la courbe de l'induction magnétique présente une boucle d'hystérésis entre les inductions B_1 et B_2 . Les pertes énergétiques dues à ce phénomène se traduisent alors par l'équation :

$$E_h = \oint H * dv$$

Les pertes en puissance sont ensuite obtenues en multipliant par la fréquence f.

$$P_h = f * E_h = f * \oint H * dv$$

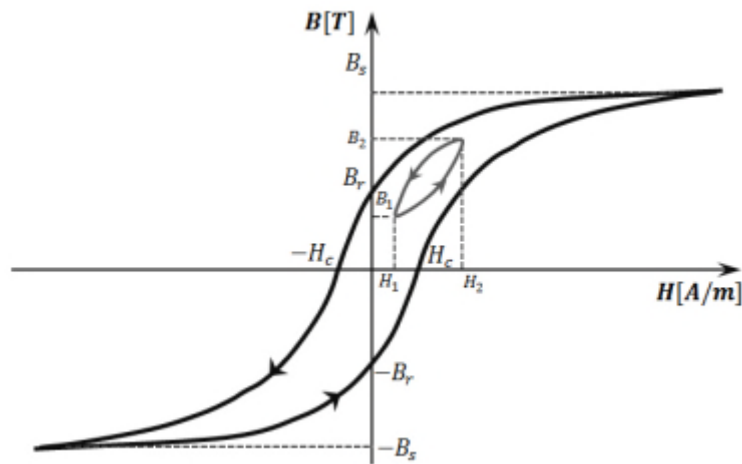


Figure II. 8 : Courbe d'hystérésis d'un matériau magnétique

2) Les pertes par courant de Foucault :

Les pertes par courant de Foucault dépendent de la fréquence et de la résistivité du matériau magnétique. A haute fréquence, des courants induits se créent dans le matériau magnétique. Dans ce cas, le flux magnétique n'est plus uniforme dans la section magnétique. Afin de limiter ces pertes, l'augmentation de la résistivité électrique peut être une solution. Cette

augmentation de résistivité provient, par exemple dans les poudres de fer, de l'adjonction de résine. Celle-ci isole les grains des autres, réduisant ainsi la création de courants induits. Les tôles magnétiques quant à elles, sont composées d'un mélange de fer et de Silicium pour augmenter la résistivité du fer pure.

Une seconde possibilité est de laminier le circuit magnétique. Cette solution est retenue sur les circuits magnétiques en tôle. Les tôles ont une épaisseur comprise entre 0.23 et 1mm. Le choix de l'épaisseur de la tôle dépend ainsi de la profondeur de peau et donc de la fréquence d'utilisation. La lamination du circuit magnétique a cependant un coût non négligeable et l'on favorise généralement des tôles épaisses si les pertes le permettent.

Conclusion

Dans ce chapitre j'ai permis de cerner la majorité des points rencontrés dans le phénomène thermique dans le transformateur, une recherche préliminaire a été faite en se basant sur les théories et des équations (Les équations de Maxwell). Ensuite on a décrit le logiciel utilisé dans notre étude.

Ensuite on a parlé sur les transferts thermiques en générale puis précisément sur transferts thermiques dans transformateur soit par (convection, conduction et rayonnement) en parlant sur les différents types de perte peut rencontrer dans le transformateur.

Chapitre III

***Simulation numérique de transfert
thermique dans un transformateur
monophasé***

III. Simulation numérique de transfert thermique dans un transformateur monophasé :

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on entamera une simulation qui sera constitué de plusieurs étapes, et pour ce faire, on aura besoin de logiciel FEMM qui est basé sur la méthode des éléments finis pour simuler le fonctionnement d'un transformateur monophasé. En présentant les résultats des simulations magnétiques et analyserons les résultats de calcul des températures dans le cas du modèle thermique du transformateur. Et qui va nous permettre de constituer une continuité parfaite afin d'obtenir une lecture optimal de notre simulation.

III.2 Simulation de logiciel FEMM:

Dans le présent chapitre, l'étude du comportement du flux magnétique dans le circuit a été menée par simulation à partir des différentes étapes et processus utilisant le logiciel FEMM.

La simulation du champ magnétique généré par une bobine a été faite dans FEMM, un solveur électromagnétique numérique qui utilise la méthode des éléments finis (FEM). Les entrées du logiciel sont les dimensions de la bobine, le nombre de spire, le courant parcouru à la bobine, les conditions aux limites. La sortie du logiciel permet de déterminer la valeur du champ magnétique à n'importe quel point dans l'espace limité. Le maillage a été créé avec de nombreux nœuds pour la précision.

La comparaison entre les résultats de ces simulations a été faite et cela pour voir le changement de l'induction magnétique et l'inductance de bobine dans le circuit magnétique étudié.

III.3 Présentation de Logiciel FEMM:

III.3.1 Définition :

Le programme FEMM (Finite Element Method Magnetics) permet de résoudre des différents problèmes en électromagnétique en électrostatique en géométrie planaire ou axisymétriques bidimensionnels (2D) en utilisant la méthode des éléments finis.

III.3.2 Processus sur logiciel FEMM:

Le logiciel FEMM comporte une série de s/programmes permettant de résoudre des problèmes électromagnétiques ou thermiques à basse fréquence, en 2D ou axisymétriques. Ce logiciel, développé par David Meeker, est une open source programme qui se compose de trois processeurs :

- **femm.exe** : est un post et pré-processeur contenant une interface graphique qui permet de fixer la géométrie du problème, les propriétés matérielles ainsi que les conditions aux limites. Après l'analyse, la solution est affichée sous forme de contour, densité de flux... Le logiciel permet également d'évaluer un certain nombre d'intégrales et de tracer diverses quantités d'intérêt le long de contours définis par l'utilisateur.
- **triangle.exe** : découpe les régions du problème en éléments triangles, ce qui constitue une étape importante de l'analyse par éléments finis (mesh ou maillage).
- **fkern.exe** : est un solveur qui résout les équations aux dérivées partielles pour obtenir les valeurs du champ magnétique dans le domaine étudié. Le langage LUA est également intégré dans les pré- et post-processeurs. Il suffit d'écrire un programme ou de donner des instructions dans la console LUA pour commander les étapes de calculs.

Étapes de mise en œuvre de ce programme pour résoudre un problème en électromagnétique ou thermique sont résumées dans l'organigramme ci-dessous [Fig.III.1] :

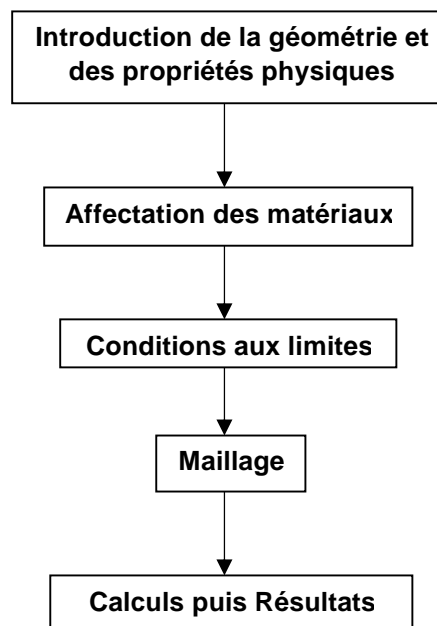


Figure III. 1 : Différentes étapes de calcul sous FEMM

III.4 Description de problème étudié :

Le transformateur monophasé standard est forme de deux bobines électriques fortement couplé autour de la colonne centrale du noyau, Le couplage magnétique est réalisé à l'aide de matériaux ferromagnétiques. Il s'agit généralement d'acier auquel on a ajouté du silicium qui a pour propriété de réduire les pertes par hystérésis et par courants de Foucault. Le circuit secondaire est enroulé au-dessus du circuit primaire comme les détails géométriques de transformateur vous voyez sur [Fig.III.2]. Les deux enroulements sont égaux du nombre de spires $N_1 = 2000$, $N_2 = 1000$ et le courant nominal égale 2A.

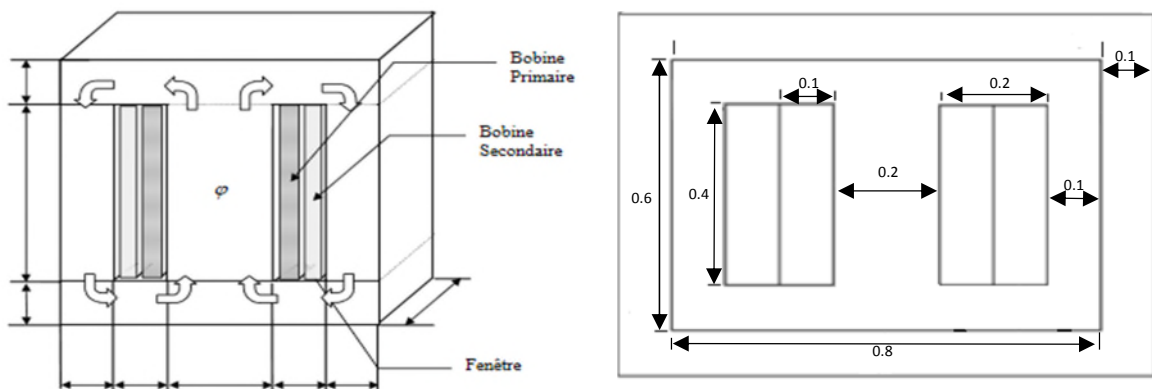


Figure III. 2 : Dimension de transformateur monophasé (es dimensions en mètre)

Simulation de problème magnétique :

Avec la simulation en éléments finis et à l'aide FEMM. Ont permis de calculer et de montrer la répartition d'inductions magnétiques dans le transformateur en évaluant la valeur du courant à vide et du courant nominal de ce transformateur.

III.4.1.1 Matériaux du transformateur :

Les différents matériaux utilisés dans transformateur et leurs propriétés montré sur le tableau suivant :

Matériaux	Caractéristique	
	μ_r	σ
Cuivre (Copper)	14872	10.44
Fer (Pure Iron)	1	58
Air	1	0

Tableau III. 1 : Matériaux utilisé dans transformateur

III.4.1.2 Conditions aux limites :

Des conditions aux limites sont indispensables pour la résolution du problème mathématique lié à une modélisation thermique.

L'application sur un composant magnétique de conditions aux limites doit être prise en compte dès la phase de modélisation de la géométrie. En effet, les surfaces externes du composant sur lesquelles les conditions aux limites seront appliquées doivent être séparées. Des opérations géométriques de segmentations de surfaces de certains constituants sont donc nécessaires, comme par exemple pour le bobinage, dont la surface externe est masquée ou non par le circuit magnétique.

Dans notre cas précisément avec la géométrie qu'on va définir dans la figure suivante [Fig.III.3]. Condition aux limites seront de type Dirichlet avec $A=0$ sur le contour extérieur de la zone qu'on va étudier.

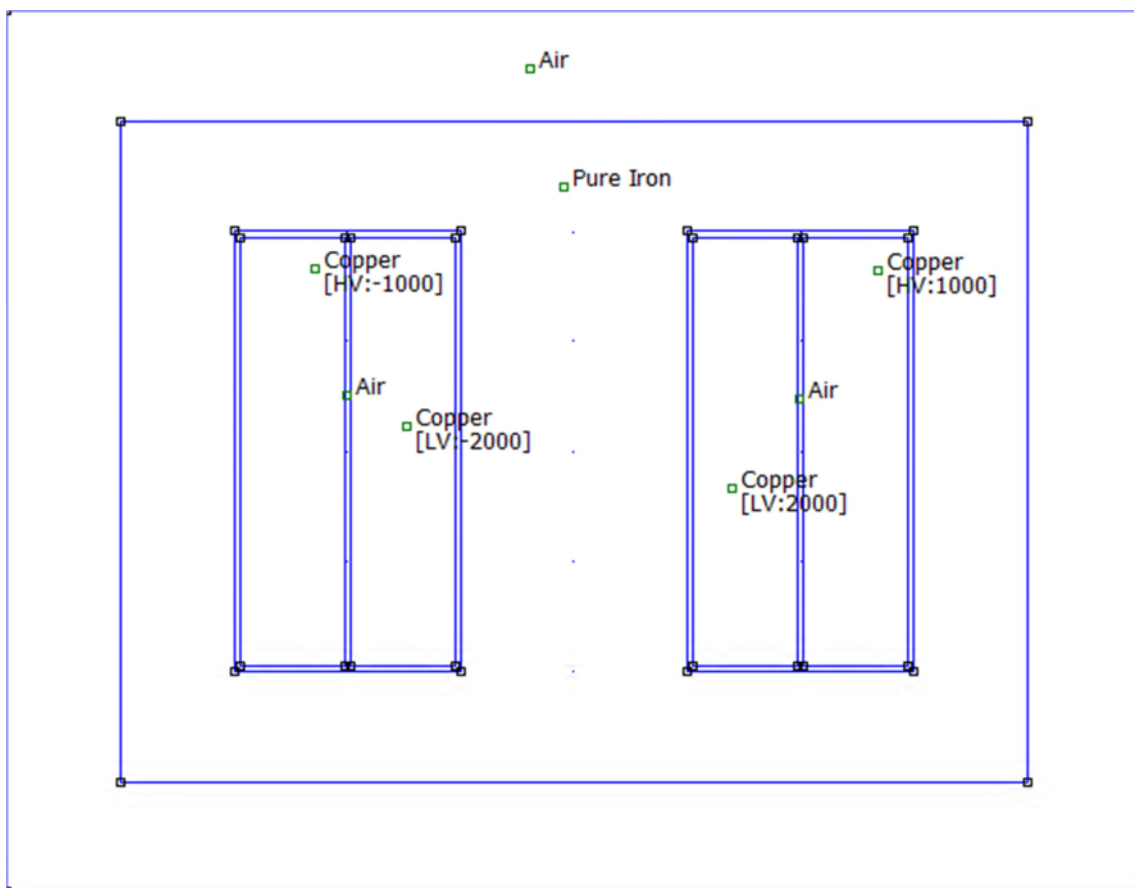


Figure III. 3 : Conditions aux limites sur le contour extérieur de la zone étudiée

III.4.1.3 Maillage :

Le maillage de la géométrie est une étape cruciale lors de la modélisation par FEMM, car les équations de comportement magnétique possèdent une forte non linéarité ce qui induit de nombreux problèmes de convergence. L'augmentation du nombre d'éléments permet, quant à elle, d'assurer une bonne précision, il faut à la fois choisir une bonne forme et un bon nombre d'éléments. Pour la résolution de problème.

La [Fig.III.4] montre le maillage du noyau magnétique et du bobinage du composant modélisé.

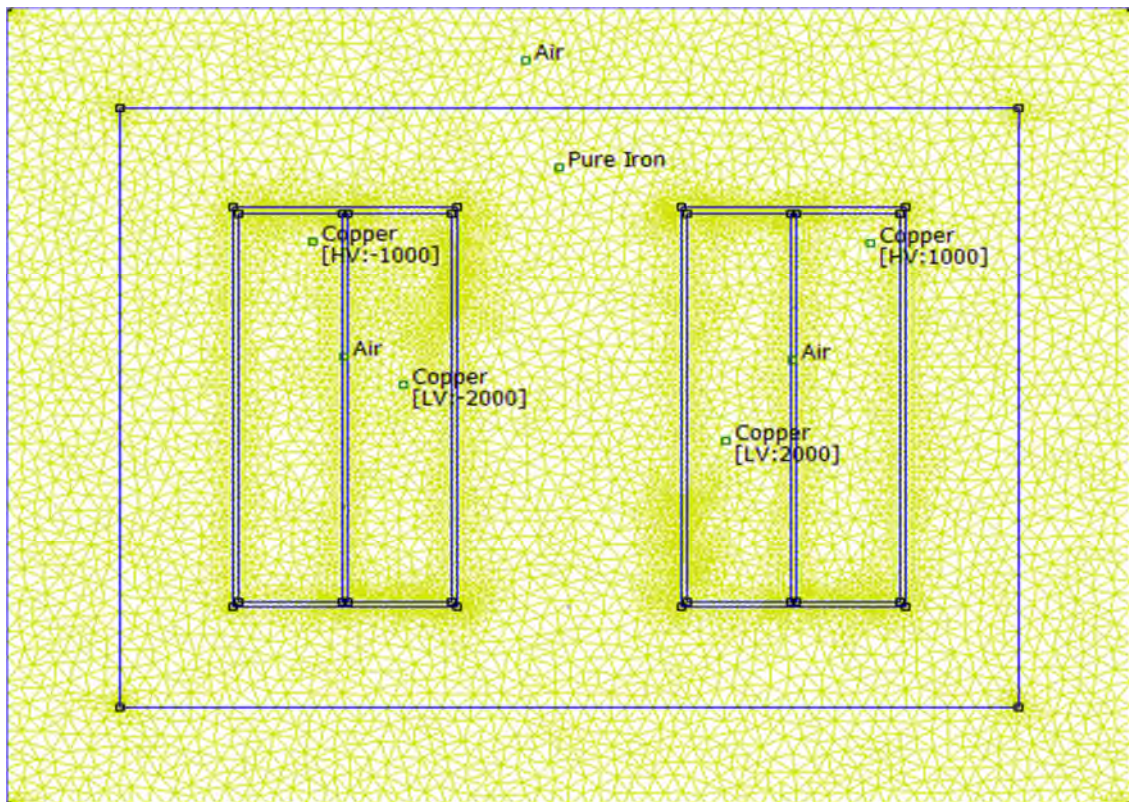


Figure III. 4 : Maillage en éléments finis du système

III.4.2 Etude le comportement magnétique à vide :

L'essai consiste à appliquer à chaque fois un courant au primaire avec un courant nul au secondaire. La mesure du courant, de la puissance et de la tension permet l'obtention du comportement magnétique du transformateur.

A partir de la courbe de flux magnétique en fonction du courant on peut déterminer le courant à vide $I_p = 0.1A$, voir la [fig.III.5].

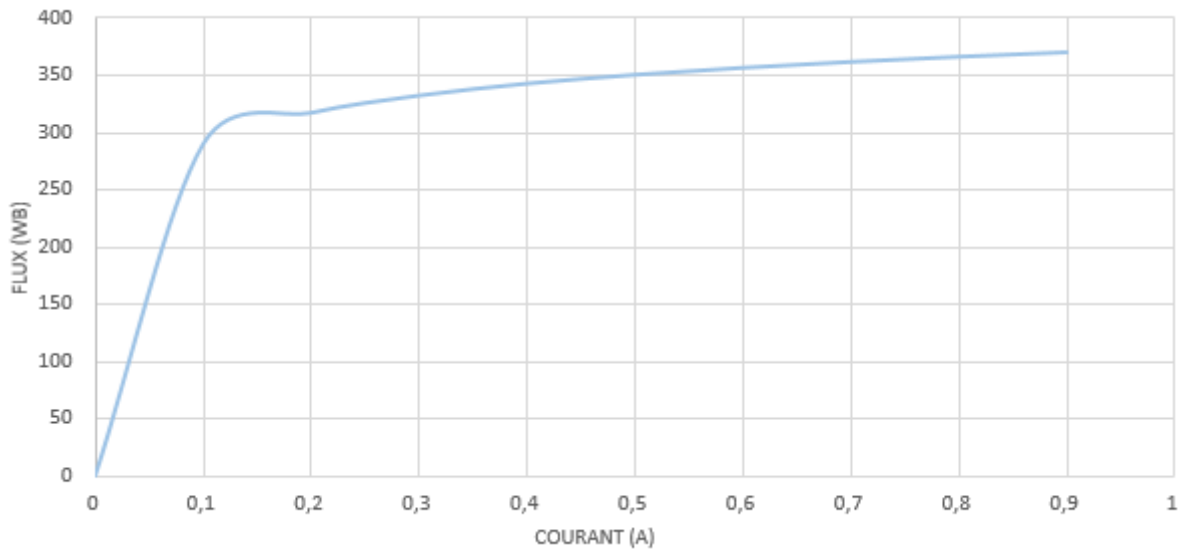


Figure III.5 : Flux magnétique en fonction du courant à vide

D'après la courbe représenté sur [Fig.III.5] on constate que le courant à vide est très faible, mais pratiquement jamais nulle, puisqu'il y a toujours un courant de magnétisation. L'amplitude maximale de ce signal a pour valeur $I_p=0.1A$.

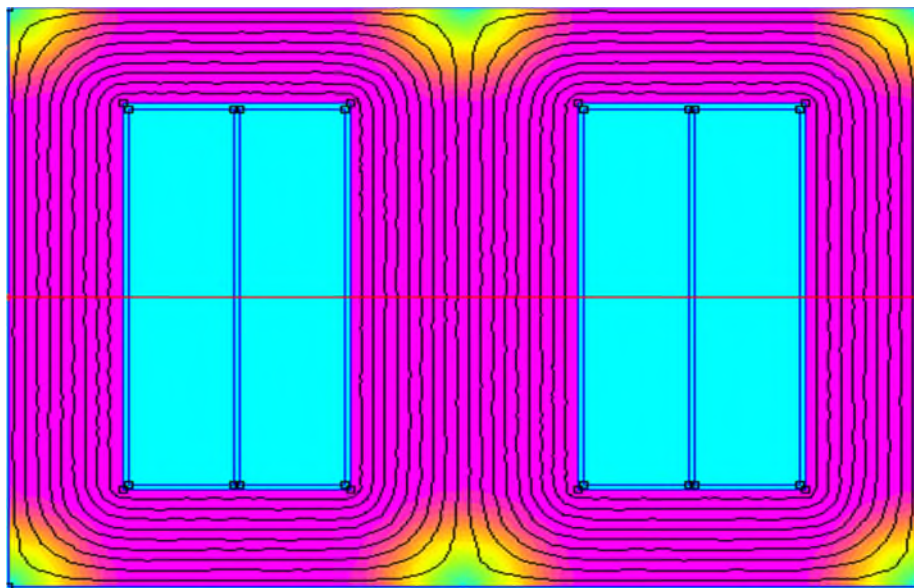


Figure III. 6 : Induction magnétique dans le transformateur à vide

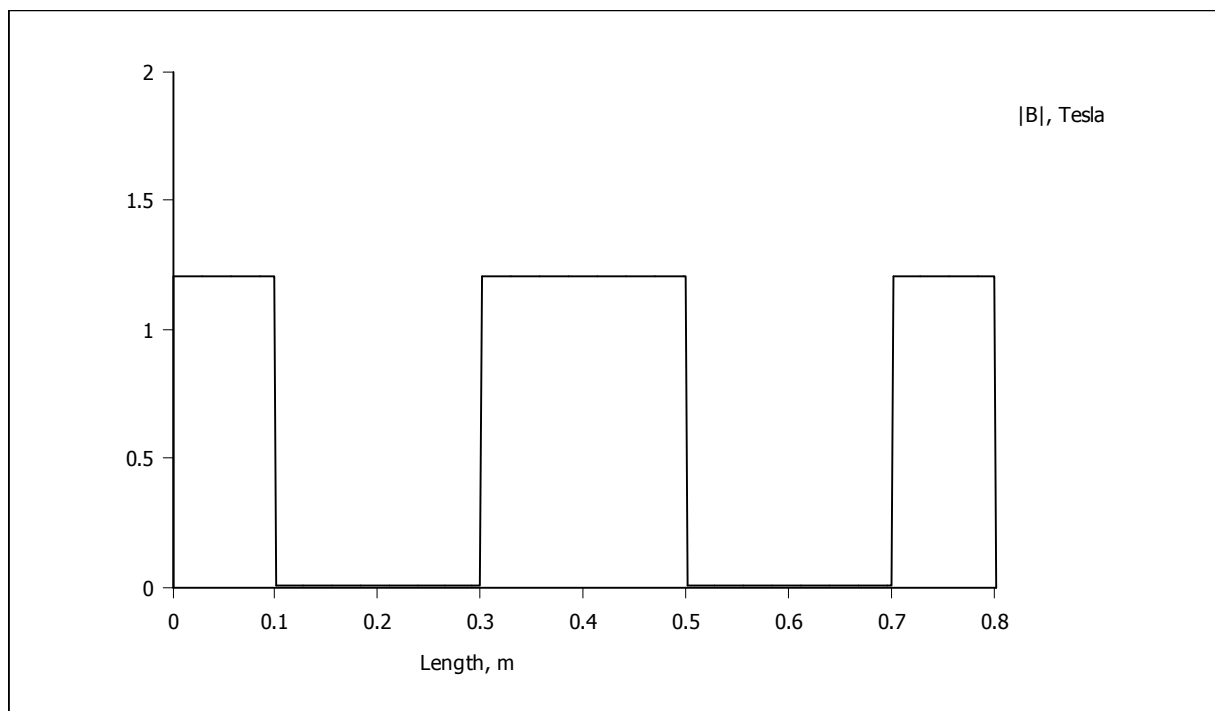
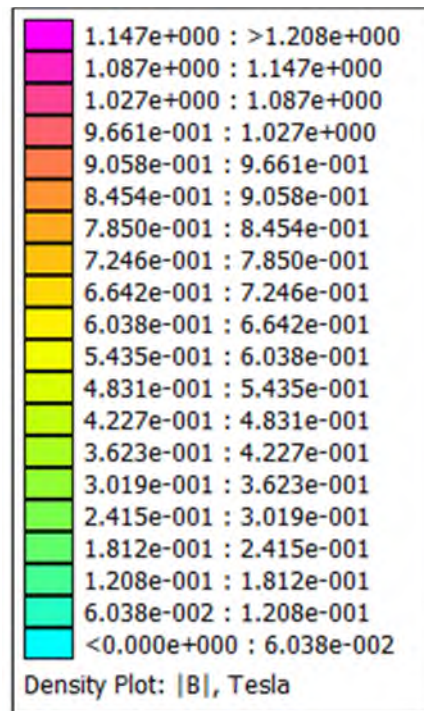


Figure III. 7 : Induction magnétique en fonction de la longueur

III.4.3 Etude le comportement magnétique en charge :

Courant aux bornes de l'enroulement primaire à 2000 tours est $I_p=1$ A, et le courant aux bornes de l'enroulement secondaire à 1000 tours est $I_s=2,0$ A. La figure III.8 et La [fig.III.9] montrent les résultats d'induction magnétique du transformateur en charge à courant nominal du $I=2A$.

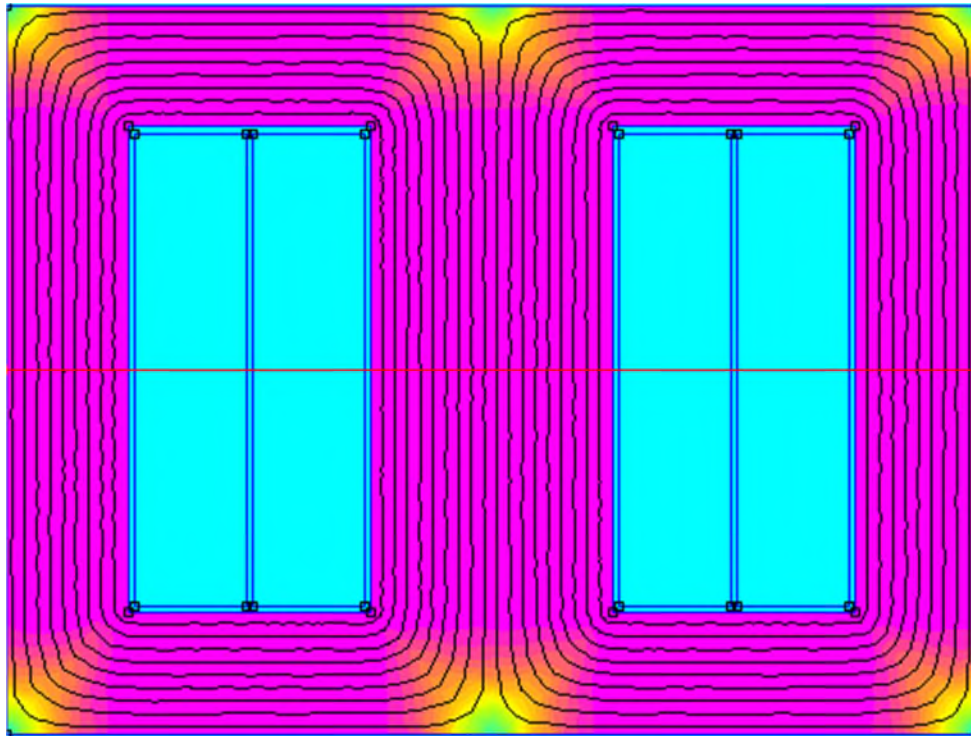
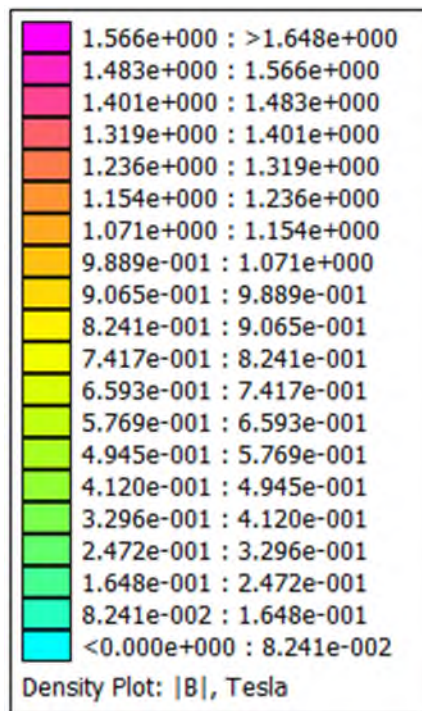


Figure III.8 : Induction magnétique dans le transformateur en charge



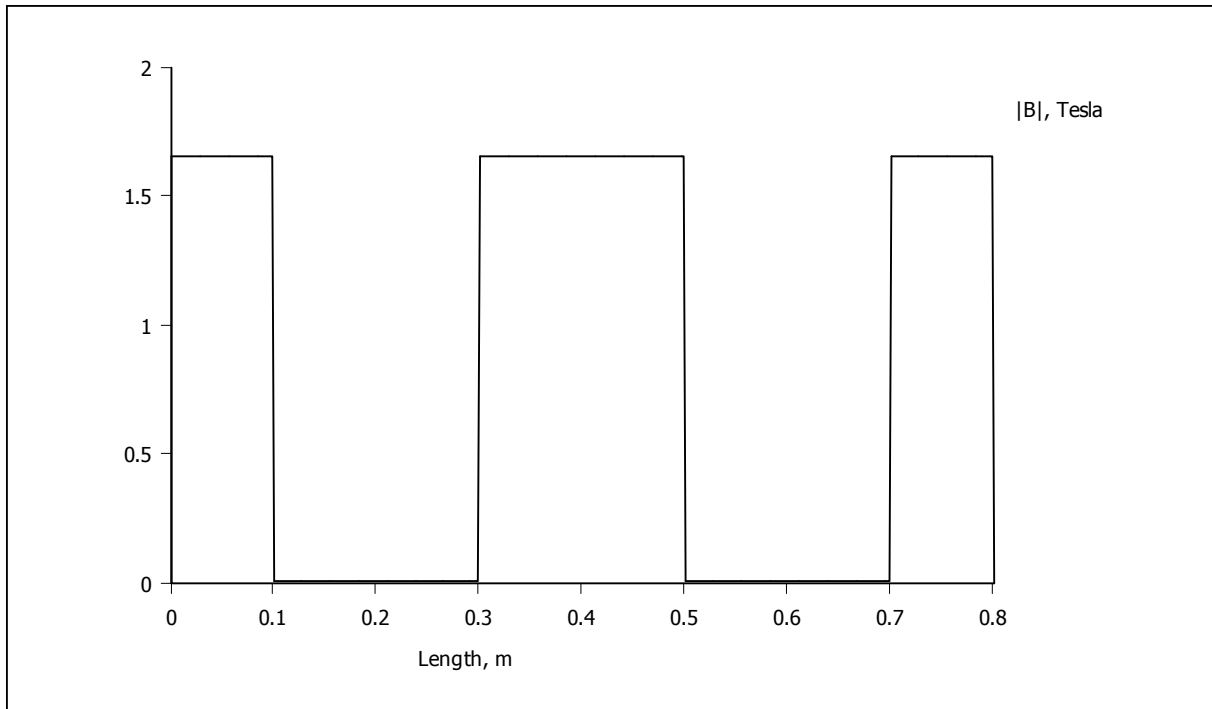


Figure III.9 : Induction magnétique en fonction de la longueur cas en charge

La densité de courant (Cas de courant = 2A), provoque une valeur élevée des pertes Joules qui augmentent drastiquement et de la densité de flux magnétique et dans ce cas flux magnétique atteint la saturation moins que le cas à vide.

III.4.4 Simulation de problème thermique :

On garde la même dimension qu'on a déjà utilisée dans le tableau III.1

Les différents matériaux utiliser dans l'étude thermique se trouve dans le tableau suivant ;

Matériaux	Caractéristique		
	λ [W/m/K]	C_p [Kg/m ³]	ρ [J/kg/K]
Fer	80	444	7.86
Cuivre	390	385	8.92
Fibre glace	0.03	1130	2.6
Air	0.025	1004	1.29

Tableau III. 2 : Matériaux utilisé dans transformateur

III.4.4.1 Conditions de limites:

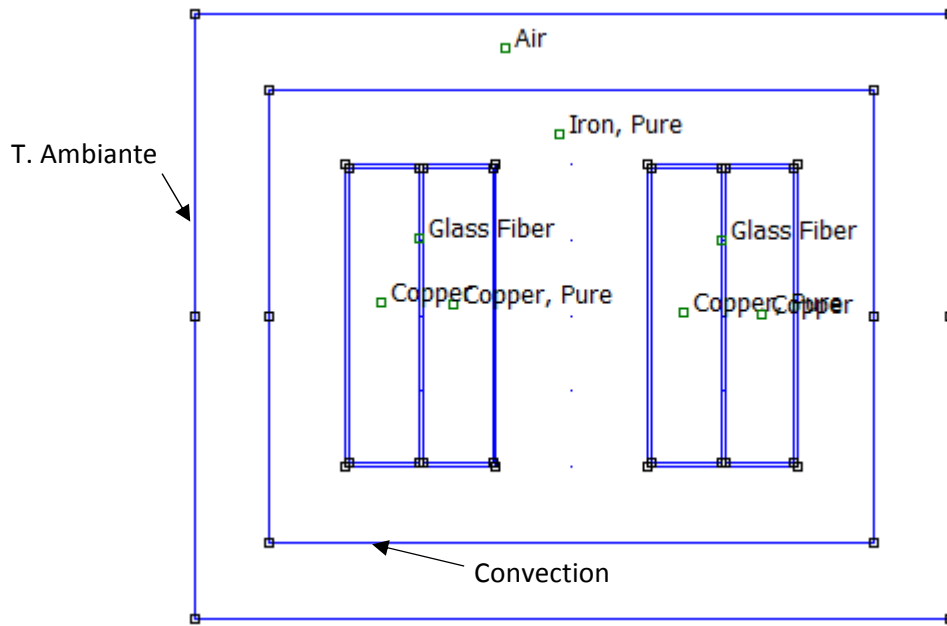


Figure III.10 : Conditions aux limites sur transformateur

- La température ambiante constante $T=298K$.
- La condition de convection sur la surface externe du transformateur ce qui permet de définir le coefficient de convection pour l'air externe $H=30$.

III.4.4.2 Maillage en éléments finis du transformateur :

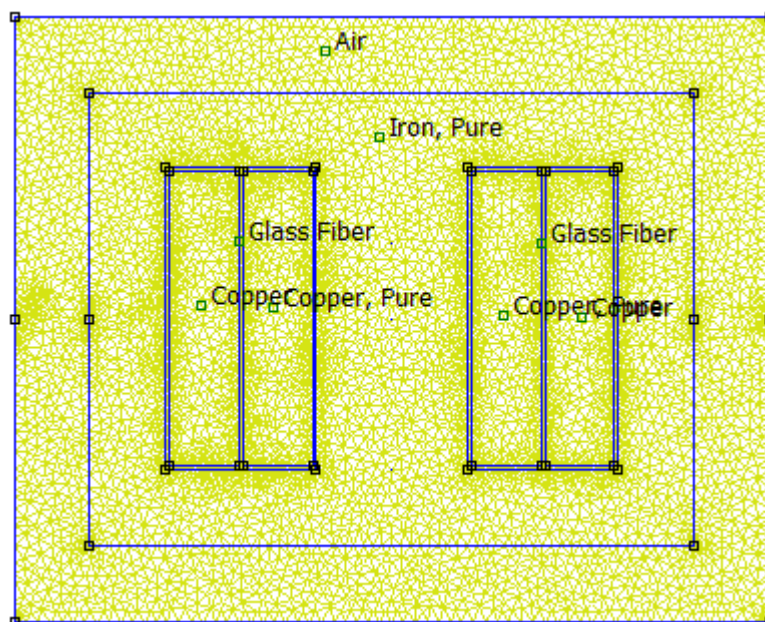


Figure III.11 : Maillage en éléments finis du système

III.4.5 Etude le comportement thermique à vide :

A vide la charge est débranchée, Rappelons, que la puissance active à vide est égale aux pertes dans le noyau magnétique du transformateur, et les pertes les pertes volumiques se situent uniquement dans le bobinage primaire du transformateur car le courant secondaire est nul et on n'a tenu compte que des pertes joule $P_{fer} = 0$.

Pertes volumiques :

On a dans cas à vide $P_{fer} = 0$

On a :

$$R_1 = 2.29407 \Omega$$

$$I_p = 0.1 A$$

$$N_p = 2000 \text{ tr}$$

Donc :

$$N_p * I_p = 2000 * 0.1 = 200A$$

Pour calculer le flux thermique à vide on doit d'abord trouver les pertes qui se trouvent au niveau de bobinage primaire puis le volume de bobine primaire.

On a :

$$P_{joule\text{-}primaire} = R_1 * I_1^2$$

$$P_{joule\text{-}primaire} = 2.29407 * 0.1^2$$

$$P_{joule\text{-}primaire} = 0.0229407 W$$

Et

$$V_{primaire} = Imoy * section = 2 * (0.3025 + 0.6) * 0.036075 = 0.06511538 m^3$$

(Le volume du cuivre dans la bobine primaire)

Donc :

$$P_{Volumiques} = \frac{P_{joule\text{-}primaire}}{V_{primaire}} = \frac{R_1 * I_1^2}{V_{primaire}}$$

$$P_{Volumiques} = \frac{0.0229407}{0.06511538}$$

$$P_{Volumiques} = 0.35230847 W/m^3$$

Les figures III.12 et III.13 représentent la répartition et la variation de la température dans le transformateur à vide.

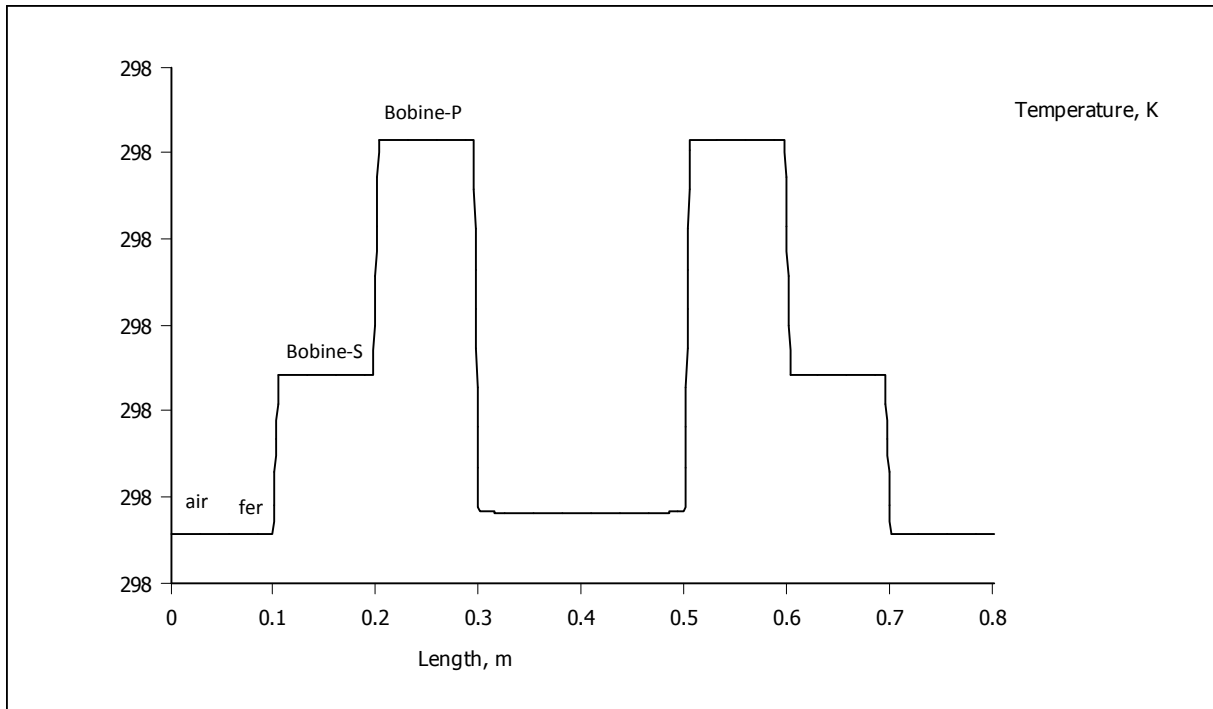


Figure III. 13 : Courbe de variation de température dans différents zone de transformateur cas à vide

III.4.6 Etude le comportement thermique en charge:

1. Propriétés du circuit:

Circuit primaire	Circuit secondaire
$R_p=2.29407\Omega$	$R_s=0.573518\Omega$

Tableau III. 3 :Condition de fonctionnement en charge

2. Pertes volumiques :

Les pertes volumiques dans le cas en charge se trouvent dans les deux bobines primaire et secondaire.

On a dans cas en charge

Donc :

$$NI= 1000*2=2000A$$

Pour calculer le flux thermique en charge on doit d'abord trouver les pertes qui se trouvent au niveau de bobinage primaire et secondaire puis le volume des bobines (primaire et secondaire).

On a :

$$P_{\text{joule-primaire}} = R_p * I_p^2$$

$$P_{\text{joule-primaire}} = 2.29407 * 1^2$$

$$P_{\text{joule-primaire}} = 2.29407 \text{ W}$$

Et

$$V_{\text{primaire}} = 0.06511538 \text{ m}^3 \quad (\text{Le volume du cuivre dans la bobine primaire})$$

Donc :

$$P_{\text{Volumiques-p}} = \frac{P_{\text{joule-primaire}}}{V_{\text{primaire}}}$$

$$P_{\text{Volumiques-p}} = \frac{2.294070}{0.06511538}$$

$$P_{\text{Volumiques-p}} = 35,230847 \text{ W/m}^3$$

$$P_{\text{joule-secondaire}} = R_s * I_s^2$$

$$P_{\text{joule-secondaire}} = 0.573518 * 2^2$$

$$P_{\text{joule-secondaire}} = 2,294072 \text{ W}$$

Et :

$$V_{\text{secondaire}} = I_{\text{moy}} * \text{section} = 2 * (0.4975 + 0.6) * 0.036075 = 0,079184 \text{ m}^3$$

Donc :

$$P_{\text{Volumiques-s}} = \frac{P_{\text{joule-secondaire}}}{V_{\text{secondaire}}}$$

$$P_{\text{Volumiques-s}} = \frac{2,294072}{0,079184}$$

$$P_{\text{Volumiques-s}} = 28,971408 \text{ W/m}^3$$

Les figures III.14 et III.15 représentent la répartition et la variation de la température dans le transformateur en charge.

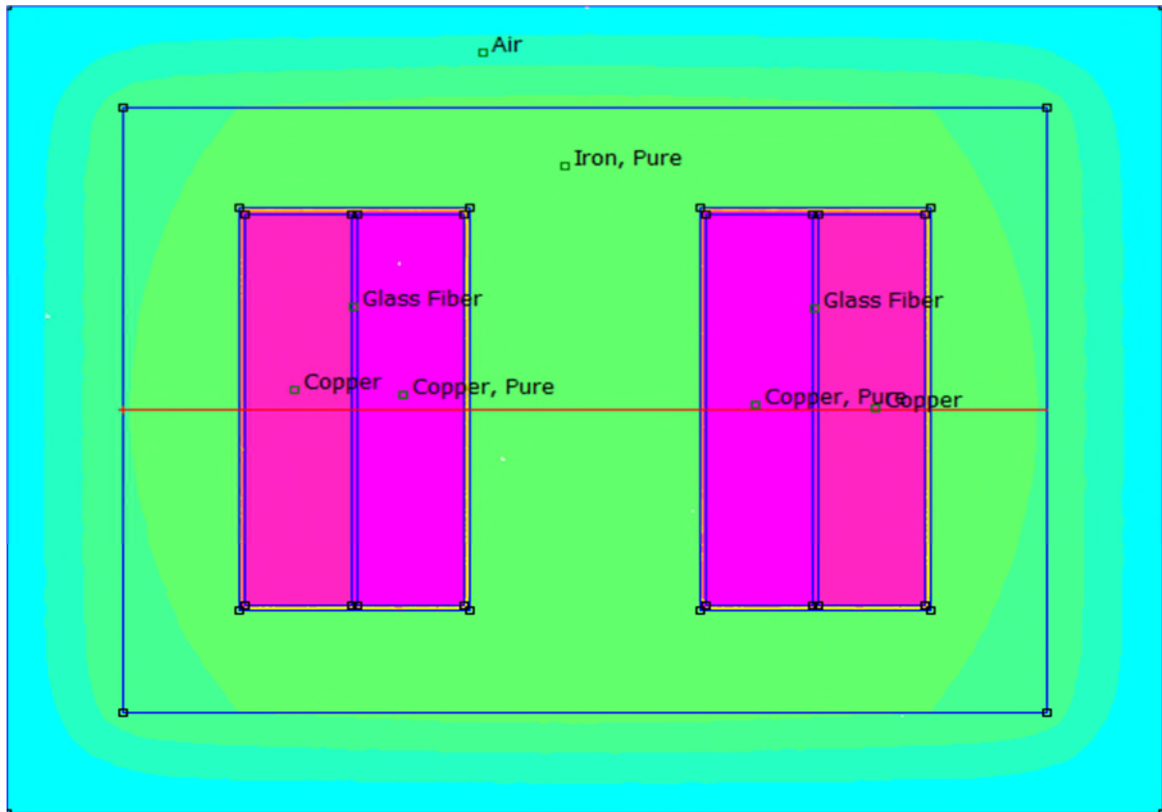
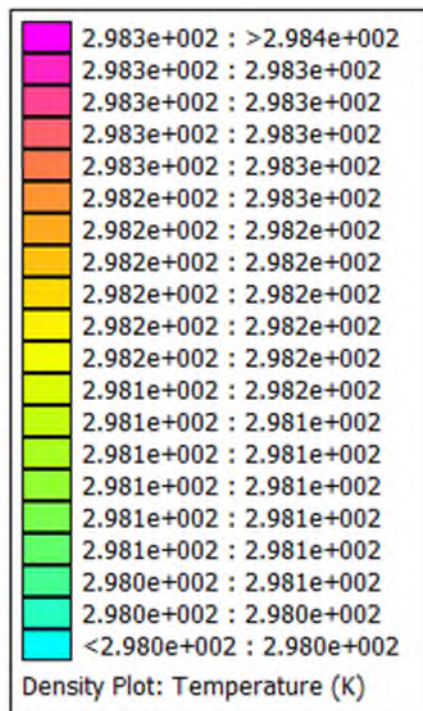


Figure III. 14 : Répartition de température dans le transformateur en charge



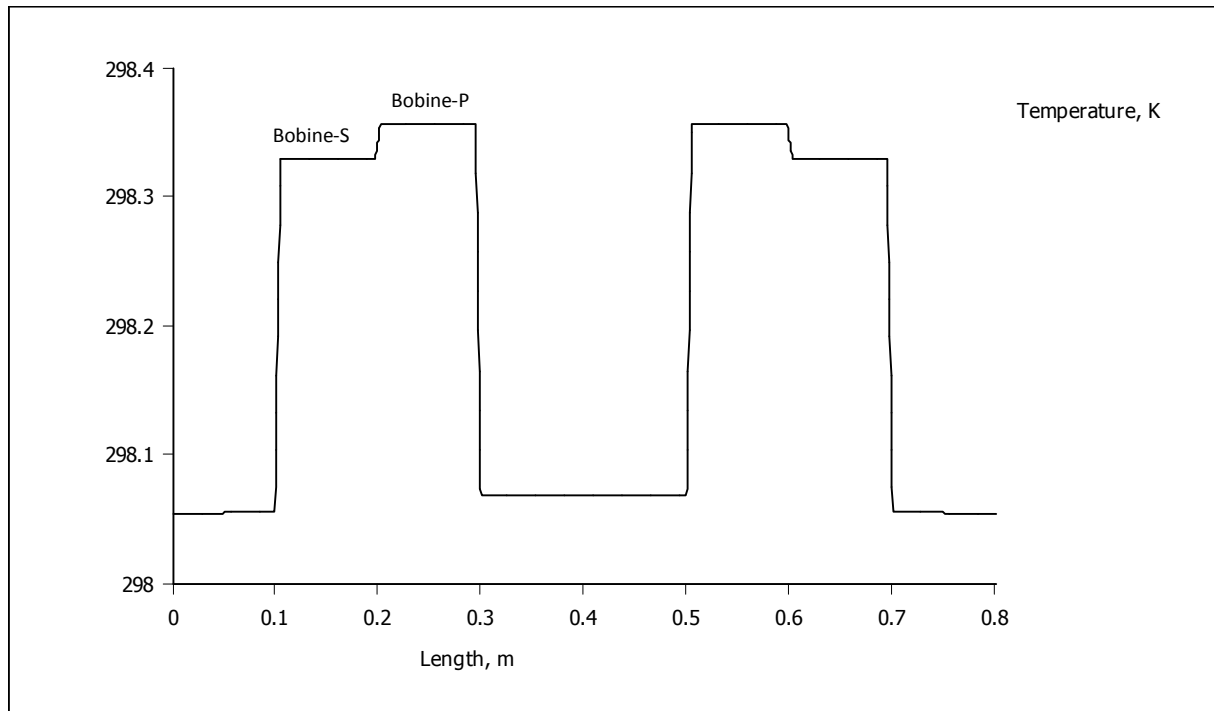


Figure III. 15 : Courbe de variation de température dans différents zone de transformateur en charge

Les pertes cuivre dans les enroulements, sont dues à l'effet JOULE. De plus, une augmentation de la température dans les enroulements augmente les pertes JOULE.

La température dans le cas en charge, plus élevée par rapport au cas à vide.

III.4.7 Résultats obtenus :

Les pertes dépendent des puissances mises en jeu et ce qui provoque une chaleur importante. C'est pourquoi il est nécessaire de concevoir un système de refroidissement du transformateur, que l'on étudie dans le paragraphe suivant.

En résumé; les pertes fers et les pertes joules sont des sources d'échauffements dans les différents éléments conducteurs du transformateur. Pour cela :

- ❖ Les pertes cuivre dans les enroulements, sont dues à l'effet joule, sont proportionnelles au carré du courant. De plus, une augmentation de la température dans les enroulements augmente les pertes joule .
- ❖ Les pertes fer regroupent les pertes par hystérésis et celles par courants de FOUCAULT dans le circuit magnétique sont concéder nul.

L'échange entre l'ensemble des surfaces extérieures du transformateur est modélisé par un coefficient d'échange convectif $h=30 \text{ W/m}^2/\text{K}$ et une température extérieure $T_{ext}=298\text{k}$. En

toute rigueur, h évolue avec la température T et diffère d'une surface à l'autre, apportant ainsi une forte non-linéarité au système. Cependant, notre étude tente de montrer les limites thermiques du transformateur.

Le flux de chaleur, se propage essentiellement à travers le circuit magnétique, et ce malgré la faible conductivité thermique de la ferrite (le matériau est isolant) dépend de la température et la forte résistance thermique présentée par l'air contenu dans la fenêtre de bobinage. Ceci s'explique par le rapport des surfaces d'échange avec l'air ambiant, la surface extérieure du circuit magnétique est bien plus importante que la surface de cuivre. Il en va de même pour l'échange en face avant et arrière du circuit magnétique.

Conclusion

D'après les chapitres précédents qui visent quelques éléments importants sur les transformateurs, son fonctionnement et calculs thermiques, on peut maintenant expliciter, dans ce chapitre. La répartition de la température dans différents points de transformateur avec conditions de fonctionnement différentes à vide et en charge.

Comme dans tout système, l'élévation de température T générée par les différentes pertes est un point bloquant et dimensionnant des circuits magnétiques.

Au final, les résultats obtenus nous permettent de comprendre et de prendre en compte des points importants dans la façon de fabriquer et même dans la maintenance de transformateur, par exemple après ces quelques éléments importants sur le transformateur, on peut maintenant expliciter, les phénomènes thermiques ayant lieu lors du fonctionnement.

A decorative graphic of a scroll with a light blue border and rounded corners. The scroll is partially unrolled, with the top and bottom edges curving upwards. The text is centered within the scroll.

Conclusion générale

Conclusion générale

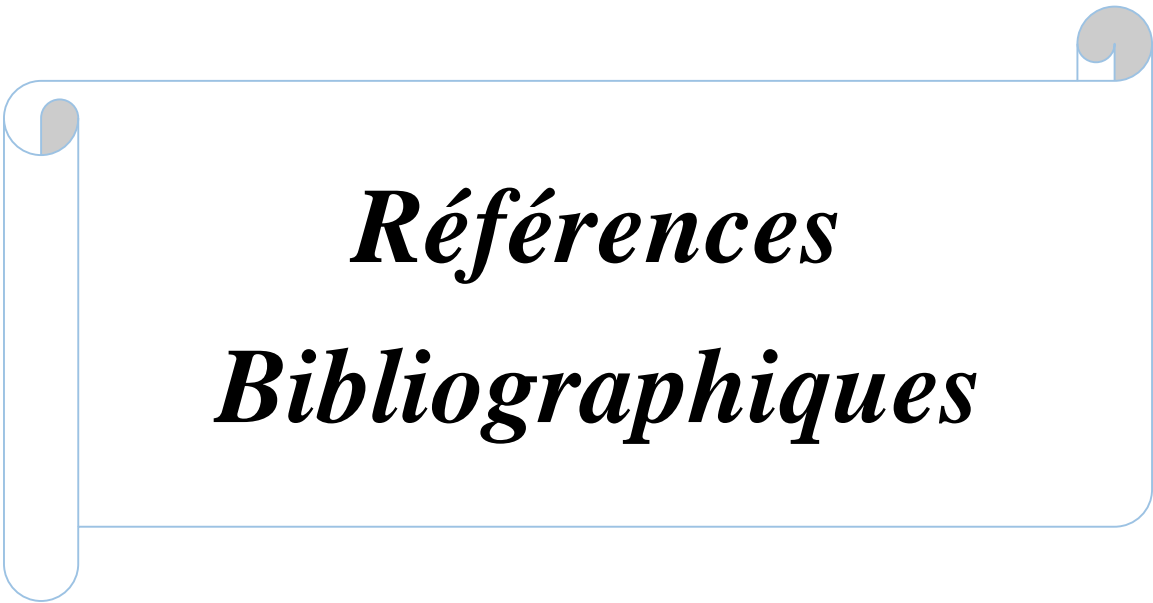
Cette étude m'a permis de mieux connaître à la fois la modélisation magnétique et thermique dans le transformateur monophasé. Et de mieux connaître le comportement magnétique et thermique des transformateurs, à l'aide la méthode des éléments finis 2D on arrive à distinguer et à connaître l'évolution du champ magnétique en tout point de l'espace à partir des équations aux dérivées partielles (phénomène électromagnétique) et sur répartition de la température dans différents points de transformateur en basant sur les théories et les équations de Maxwell (phénomène thermique).

Dans ce travail j'ai appliqué le logiciel FEMM qui est basé sur la méthode des éléments finis pour simuler le fonctionnement d'un transformateur monophasé, j'ai commencé par calcul des pertes volumiques pour le modèle thermique, en mettant la géométrie du circuit utilisé pour distinguer l'influence des pertes joules sur le comportements de la température. Et pour enfin mieux comprendre la répartition de la température dans les différents points de transformateur et pouvoir prendre en compte la façon de dimensionnement et l'isolation du transformateur.

Un calcul préliminaire a été fait en se basant sur le cahier des charges, à partir des dimensions de départ. Différentes contraintes (magnétiques, thermiques) ont été calculée, dans les différentes parties du transformateur, en tenant compte des conditions réelles de fonctionnement.

Les résultats obtenus doivent être situés dans les limites admissibles établies par les expériences effectuées sur d'autres transformateurs existantes. Dans le cas contraire, des corrections nécessaires de certains paramètres doivent être effectuées jusqu'à l'obtention des variantes répondant aux normes en vigueur et aux spécifications du cahier des charges.

L'élaboration de ce présent mémoire, nous a permis d'approfondir et d'enrichir nos connaissances dans le domaine de l'électrotechnique en général et de la technologie de fabrication des transformateurs en particulier.



***Références
Bibliographiques***

Références bibliographiques

- [1] https://fr.wikibooks.org/Le_transformateur_monophas consulté le (13h56, 30/05/2021)
- [2] F. Milsant « Electrotechnique : Machines électriques », Editions Berti.
- [3] N. Bouaziz « Modélisation par élément finis d'un transformateur de puissance », Mémoire de fin d'études ingénieur, université de Tizi-Ouzou, 2005.
- [4] K. Djaroun et F.Kaci « Calcul d'un transformateur hermétique de distribution 315 KVA, 10 KV / O, 4 KV », Mémoire de fin d'études ingénieur, université de Tizi-Ouzou, 2003.
- [5] <http://maphysiqueappliquee.free.fr> M. Dedieu ; Lycée J.Perrin (95) consulter le 31/05/2021
- [6] <http://www.tsv-transfo.com/fr/fonction-transformateur-electrique/circuit-magnetiquetransformateur-electrique/> consulter le 31/05/2021
- [7] Luc Lasne, Exercices et problèmes d'électrotechnique : Notions de base, réseaux et machines électriques, Dunod, 2011
- [8] Cours ELT2 L2- S4 -2019-2020 / Pr CHAOUCH.S
- [9] Gabriel Cormier, "chapitre08-transformateur", GEN1153.
- [10] https://tpmpathome.univlille.fr/transformateur_monophas/co/transformateur_monophas_web_courte/co/module_transformateur_monophas_2.html
- [11] Imadeddineharzelli, «contribution à la modélisation par les méthodes des volumes finis d'un transformateur de courant», Magister en : Electrotechnique. Université Mohamed khaidar biskra.02 octobre 2014.
- [12] F. Leplus, Bobine à noyau de fer en régime variable, Techniques de l'Ingénieur, D 3010
- [13] [https://illustrationprize.com/fr/691-types of transformer.html#](https://illustrationprize.com/fr/691-types-of-transformer.html#) Step up and Step down Transformer
- [14] THEODORE WILDI, GILBERT SYBILLE, « ÉLECTROTECHNIQUE », 4ème Edition.2005
- [15] - FRANCIS MILSANT, « Machine Electrique », Edition BERT
- [16] A. Fouillé « Electrotechnique à l'usage des ingénieurs », Tome 2, Machines électriques, 7ème édition, Editions Dunod, Paris 1966.

Références bibliographiques

[17] B. Hochart, coordonnateur « Le transformateur de puissance », 2^{ème} édition, Technique et documentation (Lavoisier), 1988.

[18] H.AGHBECHÉ, F. HAMANA, S.DAHMANE, « Etude d'un transformateur de distribution immergé dans l'huile MT/BT 50kVA/11kV/0,4kV », DEUA, UMMT, 2008.

[19] Reda Bakri. Modélisation thermique des composants magnétiques planar pour l'électronique de puissance. Thermique [physics.class-ph]. Ecole Centrale de Lille, 2018. Français. ffNNT : 2018ECLI0005ff. fftel-02968833f.

[20] "IEC Guide for the determination of thermal endurance properties of electricalinsulatingmaterials." IEC 60216-1, 2001.

[21] J.-L. Battaglia and A. Kusiak, "Introduction aux transferts thermiques Cours et exercices corrigés."

[22] "PaytonPlanar." [Online]. Available: <http://www.paytongroup.com/>.

[23] 21, rue d'Artois, F-75008 Paris <http://www.cigre.org>

[24] Thèse préparée dans le cadre d'une convention CIFRE à l'Ecole Centrale de Lille et Jeumont-Schneider Transformateurs (Lyon)