

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique



Université Abderrahmane Mira

Faculté de Technologie

Département d'Electrotechnique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

En électrotechnique

Option : Machines électriques

Thème

**Modélisation et simulation numérique
d'un transformateur triphasé**

Présenté par :

IBAZIZEN Lamine

BETTACHE Massinissa

Encadré par :

Mr. ALITOCHE Karim

Devant le jury d'examen:

Mr. Saou Rachid

President

Mr. Meziani Smail

Examineur

Promotion 2020-2021

Remerciements

Avant tout, nous remercions le dieu tout puissant de nous avoir donnée la santé, la volonté, le courage, et la patience afin d'effectuer ce modeste travail.

*Aux termes d'un semestre de travail, nous sommes heureux de pouvoir exprimer toute notre gratitude envers notre promoteur **Mr. ALITOUCHE K**, enseignant à université de Bejaia A/Mira, d'avoir bien voulu nous encadrer et pour son aide et les conseils qu'elle n'a cessé de nous prodiguer pour l'aboutissement de ce travail, qu'elle trouve ici notre profonde gratitude et toute notre reconnaissance.*

Nous remercions chaleureusement (dames ou monsieur), les membres de jury d'avoir accepté de consacrer de leurs temps pour juger ce travail.

Que tous les enseignants ayant contribué et participé à notre formation trouvent ici notre profonde gratitude.

Mes remerciements et mon respect s'dressent à tous ceux qui mon soutenu tout au long de ce travail.

Merci à vous tous.

DEDICACES

Je dédie ce travail à...

À la mémoire de mon cher père AZIZ : qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études. Je ne saurais exprimer mon grand chagrin en ton absence, j'aurais aimé que tu sois à mes côtés ce jour. Décédé trop tôt, que ton âme repose en paix, et que Dieu lui garde dans son vaste paradis (amen)

À ma très chère mère : aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte

À mes frères et mes sœurs

À mon cher ami, frère et binôme Bettache Massinissa

À la personne qui m'a beaucoup soutenu : Sarah

À mes chers amis : Fares, Marouan, Lyes, Hamza, Massinissa, Tarik, Omar,

Walid, Fawzi, et Saadi

À mon encadreur Mr. ALITOUCHE Karim

À toute la famille universitaire ainsi la résidence universitaire 17 octobre 1961

à leur tête Sofiane Belhocine

Tous ceux qui me connaissent de près ou de loin

À tout la promotion 2020-2021

IBAZIZEN Lamine

DEDICACES

Je dédie ce travail à...

À mes très chers parents : Ma mère, Mon père Pour leurs amours inestimables,

leurs tendresses, leurs confiances, leurs sacrifices et toutes les

valeurs qu'ils ont su m'inculquer

À mes frères pour leurs soutiens et encouragements

*À mon cher binôme, ami et frère **Ibazizen Lamine**, je souhaite à lui une vie*

meilleur et plus de réussite au futur

À mon encadreur Mr. ALITOUCHE Karim

Spéciale dédicace à mes chers amis avec qui j'ai passé des

*moments inoubliables **Youcef, Idir, Sofiane, Kouceila, Hichem***

Fares, Marouane, Tarek, Fawzi, Omar, et Hilal.

À mes collègues pour leurs aides,

tout au long de réalisation de ce travail

À qui je témoigne toute ma reconnaissance et mes sincères remerciements

À toute la famille universitaire ainsi la résidence universitaire 17 octobre 1961

à leur tête Sofiane Belhocine

Tous ceux qui me connaissent de près ou de loin

À tout la promotion 2020-2021

BETTACHE Massinissa

Liste des figures

Chapitre I: Généralités sur les transformateurs

Figure I-1- Représentation de la partie active.....	3
Figure I-2- Schéma de montage du noyau.....	4
Figure I-3- Les différents noyaux de Circuit magnétique.....	5
Figure I-4- Bobinages en galettes.	5
Figure I-5- Représentation de la partie constructive.....	6
Figure I-6- Schémas de principe d'un transformateur.	8
Figure I-7- Transformateurs de courant.....	9
Figure I-8- Transformateurs de tension.....	10
Figure I-9- Autotransformateurs.....	10
Figure I-10- Transformateur de puissance.....	11
Figure I-11- Transformateur HT sec.....	12
Figure I-12- Transformateur HT immergé.....	13
Figure I-13- Symbole de Transformateur monophasé.....	13
Figure I-14- Transformateur monophasé idéal.....	14
Figure I-15- Circuit équivalent d'un transformateur.....	14
Figure I-16- Symbole transformateur triphasée.....	15
Figure I-17- Transformateur triphasée.....	15
Figure I-18- Indice horaire.....	17
Figure I-19- Enceinte grillagée de transformateur.....	25
Figure I-20- Cuve du transformateur.....	26
Figure I-21- Radiateur du transformateur.....	26
Figure I-22- Cuve contenant des tubes.....	27
Figure I-23- Relai de buchholz.....	28
Figure I-24- Thermomètre.....	29
Figure I-25- Les éclateurs dans le transformateur.....	30

Chapitre II : Modélisation multi-physique des transformateurs

Figure II-1- Interface entre deux milieux.....	34
Figure II-2- Exemple de courbes de première aimantation et d'énergie équivalente.....	38
Figure II-3- Détermination du tenseur de conductivité thermique.....	45
Figure II-4- Adaptation des coefficients de convection dans les espaces restreints.....	47
Figure II-5- Facteur de pertes F_r dépendant de la fréquence et d'un nombre de couches (M)...	48
Figure II-6- Durée de vie du Nomex411 en fonction de la température d'utilisation.....	48
Figure II-7- Températures mesurées en ($^{\circ}\text{C}$) sur un transformateur à self intégrée	50
Figure II-8- Complexité du système d'isolation.....	51

Figure II-9- flux de chaleur dans parallélépipède.....	53
Figure II-10- Procédé de convection.....	54
Figure II-11- Plaque chauffée.....	54
Figure II-12- Echange thermique par rayonnement sur une plaque.....	55
Figure II-13- Schéma synoptique de la problématique d'étude.....	59
Figure II-14- Algorithme de résolution magnétothermique.....	60

Chapitre III: Simulation numérique de transfert thermique dans un transformateur triphasé

Figure III -1- Organigramme de calcul utilisant la méthode des éléments finis.....	66
Figure III -2- Configuration géométrique transversal 2D de la moitié du transformateur.....	67
Figure III -3- Répartition de température dans le transformateur.....	69
Figure III -4- Répartition de température dans le transformateur.....	71
Figure III -5- Courbes de la variation de température le long de la ligne rouge des figures (-III-3-) et (-III-4-).....	71
Figure III -6- Répartition de température dans le transformateur.....	72
Figure III -7- Répartition de température dans le transformateur.....	73
Figure III -8- Courbes de la variation de température le long de la ligne rouge des figures (-III-6-) et (-III-7-).....	73
Figure III -9- Répartition de température dans le transformateur.....	74
Figure III -10- Courbe de la variation de température le long de la ligne rouge de la figure (-III-9-).....	75
Figure III -11- Répartition de température dans le transformateur.....	75
Figure III -12- Répartition de température dans le transformateur.....	76
Figure III -13- Courbes de la variation de température le long de la ligne rouge des figures (-III-11-) et (-III-12-).....	77
Figure III -14- Répartition de température dans le transformateur.....	78
Figure III -15- Répartition de température dans le transformateur.....	78
Figure III -16- Courbes de la variation de température le long de la ligne rouge des figures (-III-14-) et (-III-15-).....	79
Figure III -17- Répartition de température dans le transformateur.....	79
Figure III -18- Courbe de la variation de température le long de la ligne rouge de la figure (-III-17-).....	80
Figure III -19- Maillage élément finis 2D du transformateur.....	81
Figure III -20- Répartition de température dans le transformateur.....	81
Figure III -21- Courbe de la variation de température le long de la ligne rouge de la figure (-III-20-).....	82
Figure III -22- La variation de la température moyenne dans l'isolant en fonction de son épaisseur.....	83

Liste des tableaux

Chapitre I: Généralités sur les transformateurs

Tableau I-1 : Rapport de transformation.....	18
Tableau I-2 : Ordres de priorités.....	19
Tableau I-3 : Analyse transfo CO2.....	20
Tableau I-4 : Analyse transformateur TR1 raff 3500.....	21
Tableau I-5 : Analyse transformateur TR4 raff 3000.....	22
Tableau I-6 : Analyse local TGBT/transfo osmose.....	23
Tableau I-7 : Analyse local transfos EC DI/ELB.....	24
Tableau I-8 : Disposition des symboles.....	25

Chapitre II : Modélisation multi-physique des transformateurs

Tableau II-1 : Conductivités thermiques par matériaux [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$].....	46
Tableau II-2 : Classes thermiques.....	48

Chapitre III: Simulation numérique de transfert thermique dans un transformateur triphasé

Tableau III-1 : Données géométriques du transformateur.....	67
Tableau III-2 : Propriétés électromagnétique.....	68
Tableau III-3 : Les données du transformateur.....	68
Tableau III-4 : Les valeurs de la température moyenne de l'isolant.....	82

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les transformateurs	
I-1- Introduction	3
I-2- Transformateur	3
I-2-1- Définition	3
I-2-2- Constitution	3
I-2-2-1- Partie active	3
I-2-2-2- Partie constructive	6
I-2-2-3- Le liquide diélectrique	7
I-2-3- Caractéristiques du transformateur	7
I-2-4- Principe de fonctionnement	8
I-3- Les types des transformateurs	9
I-3-1- Les transformateurs spéciaux	9
I-3-1-1- Transformateurs de mesure	9
I-3-1-1-1- Transformateurs de courant	9
I-3-1-1-2- Transformateurs de tension	9
I-3-1-2- Autotransformateur	10
I-3-2- Transformateurs de puissance	11
I-3-3- Transformateurs de type sec enrobé	11
I-3-4- Transformateurs de type immergé	12
I-3-5- Transformateur monophasé	13
I-3-6- Transformateur triphasé	15
I-4- Détermination des éléments du modèle - La plaque signalétique - Couplage et rendement	17
I-4-1- Détermination des éléments du modèle	17
I-4-2- La plaque signalétique	18
I-4-3- Couplage	18
I-4-4- rendement	18
I-5- Echauffement et refroidissement des transformateurs	19

I-6- Modes de Refroidissement	25
I-7- Différents types de refroidissement	25
I-8- Processus d'échauffement des transformateurs	27
I-9- Protection des transformateurs	27
I-10- Flux de chaleur lié à un débit massique	30
I-11- Stockage d'énergie	30
I-12- Génération d'énergie	31
I-13- Conclusion	31

Chapitre II : Modélisation Multi-physique des Transformateurs

II-1- Introduction	32
II-2- Vieillissement	32
II-2-1 Contraintes thermiques	32
II-2-2 Contraintes électriques	33
II-3- Modèles électromagnétiques	33
II-3-1- Equations électromagnétiques	33
II-3-1-1- Equations de Maxwell	33
II-3-1-2- Relations constitutives des matériaux	34
II-3-1-3- Conditions de passage	34
II-3-1-4- Relations constitutives du milieu	35
II-3-1-5- Conditions de jauge	36
II-3-1-6- Régime harmonique et état quasi stationnaire	36
II-3-1-7- Bilan des puissances électromagnétiques	37
II-3-1-8- Prise en compte de la saturation du circuit magnétique	37
II-3-1-9- Formulation bidimensionnelle en potentiel vecteur magnétique	38
II-3-2- Phénomènes et modèles électromagnétiques	39
II-3-2-1- Modèle magnétostatique	40
II-3-2-2- Modèle magnétodynamique	41
II-3-2-3- Modèle Electrostatique	42
II-3-2-4- Modèle Electrodynamique	43

II-4- Modèle thermique	44
II-4-1-1- Hypothèses de modélisation	44
II-4-1-2- Choix des paramètres	44
II-4-1-2-1- Conductivités thermiques dans le noyau	44
II-4-1-2-2- Tenseur de conductivités thermique	45
II-4-1-3- Coefficients d'échanges convectifs et radiatifs	47
II-4-2- Domaine thermique	47
II-4-2-1- La précision de la modélisation	49
II-4-2-1-1- Les incertitudes	49
II-4-2-1-2- La complexité du bobinage	50
II-4-2-2- Les hypothèses	51
II-4-3- Généralité sur le Transfert de Chaleur	51
II-4-3-1- Environnement thermique	51
II-4-3-2- Expression des flux d'énergie	52
II-4-3-2-1- Transfert de chaleur par conduction	53
II-4-3-2-2- Convection	53
II-4-3-2-3- Rayonnement	55
II-5- Couplage Electromagnétique et Thermique	56
II-6- Les pertes	56
II-6-1- Pertes Joule	56
II-6-2- Les pertes fer	56
II-6-2-1- Pertes par hystérésis	57
II-6-2-2- Pertes par courant de foucault	57
II-6-3- Perte de cuivre ou perte ohmique	57
II-6-4- Perte supplémentaires	58
II-6-5- Perte diélectrique	58
II-7- Méthodes de résolution	58
II-7-1- Résolution par la méthode des éléments finis (MEF)	58

II-7-2- Algorithme de calcul	59
II-7-3- Discrétisation du domaine d'étude	61
II-7-4- Discrétisation des équations aux dérivées partielles (EDP)	61
II-8- Conclusion	63

Chapitre III : simulation numérique de transfert thermique dans un transformateur triphasé

III-1- Introduction	64
III-2- Présentation du logiciel F.E.M.M	64
III-3- Organigramme	65
III-4- Présentation du transformateur étudié	67
III-4-1- Les caractéristiques géométriques	67
III-4-2- Les propriétés électriques et magnétiques	67
III-5- Résolution du problème thermique	68
III-5-1- Influence de la valeur basse de Le coefficient de la conductivité de matériau isolant (glass fibre)	68
III-5-1-1- Cas du point nominal	68
III-5-1-2- Cas de demi charge	72
III-5-1-3- Cas à vide	74
III-5-2- Le coefficient de conduction équivalent aux matériaux de l'enroulement	75
III-5-2-1- Cas du point nominal	76
III-5-2-2- Cas de demi charge	77
III-5-2-3- Cas à vide	79
III-5-3- Variation de l'épaisseur de l'isolant	80
III-6-Conclusion	83
Conclusion générale	84

A decorative graphic of a scroll with a green border and three grey circular tabs at the corners. The text is centered within the scroll.

Introduction générale

Introduction générale

La production, le transport et la distribution de l'énergie électrique, se font principalement sous forme de tension et de courant alternatifs. Il est difficile de produire ou de distribuer cette énergie à haute tension. Par contre, un bon transport (économique) de cette énergie à grande distance ne peut être réalisé qu'en haute tension. Ce problème est résolu à l'aide des transformateurs.

Citons que le transformateur industriel a été créé par Lucien Gaulard et John-Dixon Gibbs en 1883. Son essor fut immédiat, les puissances réalisées augmentèrent très rapidement (de quelque 100 kVA en 1900, à quelques MVA en 1910), Le transformateur électrique qui est apparu, et a été développé dans la deuxième moitié du XIXe siècle (le premier transformateur triphasé a été construit en 1889). En effet, le transformateur est un composant fondamental en électrotechnique, son étude constitue l'un des piliers de cette discipline. Le transformateur a donc eu un rôle décisif dans le développement de l'énergie électrique. De nos jours, il est difficile d'imaginer un réseau électrique ou un appareil de conversion de l'électricité sans transformateur.

L'efficacité énergétique des transformateurs est aussi liée à la puissance nominale du transformateur qu'au type de ventilation et du type de refroidissement. En général, le rendement augmente avec la puissance, considérant par exemple deux transformateurs de même type et de construction semblable, Le transformateur qui a la puissance la plus élevée est plus efficace que le transformateur qui a la puissance la plus faible. Les transformateurs de distribution à huile avec refroidissement forcé sont plus efficaces que les transformateurs du type sec refroidi par convection naturelle.

Les pertes fer, ou à vide, sont produites par une variation de l'intensité et de la direction du flux magnétique circulant dans le circuit magnétique qui, rappelons-le, est construite avec des tôles d'acier empilées. Ces pertes sont constantes et indépendantes de la charge raccordée au secondaire du transformateur. Elles ne dépendent que de la réalisation du circuit magnétique. La quantité et la qualité de l'acier et le type d'assemblage du circuit magnétique jouent un rôle important. En effet, un acier magnétique de haute qualité combiné à des techniques d'assemblage plus sophistiquées permettent de diminuer les pertes magnétiques de 30 % à 40 %. Évidemment, cela augmente aussi le prix du transformateur. Des laminés plus minces et une meilleure isolation des tôles diminuent les courants de Foucault et les pertes magnétiques.

De plus, si le transformateur est alimenté 24 heures par jour, 365 jours par an, ces pertes assemblées et leur coût dépassent, après quelques années, le coût d'achat initial du transformateur. Avec un transformateur à haut rendement énergétique, les pertes à vide sont réduites et les économies sur ces pertes vont contribuer à la réduction des délais du retour sur l'investissement initial.

Le système de refroidissement a pour but de garder les températures des enroulements et de l'isolant (huile par exemple) à des niveaux acceptables. Le choix du mode de refroidissements se base en particulier en fonction des paramètres suivants : pertes à évacuer, température ambiante extérieur, contrainte de bruit, contraintes dimensionnelles limitant la taille de transformateur et le coût.

Le point chaud, c'est le point le plus chaud des enroulements. Le vieillissement de l'isolation du transformateur est réduit ou accéléré comparé à la vitesse de vieillissement correspondant à une température de point chaud de référence.

Ce présent travail a pour objectif, la modélisation par la méthode des éléments finis d'un transformateur triphasé à puissance 630 (kVA) abaisseur 30 (kV)/400 (V) de distribution. La finalité est la détermination des grandeurs locales telles que l'induction magnétique et les grandeurs globales telles que les pertes joules dans les enroulements, les pertes fer dans les tôles magnétiques.

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

Le premier chapitre sera l'occasion de présenter les notions de bases sur les transformateurs, les différents types, leur principe de fonctionnement, et les différents domaines de leur utilisation. Il sera aussi question de leur échauffement et refroidissement ainsi que le processus de leur protection.

Dans le deuxième chapitre, on discutera du vieillissement et ses contraintes mais aussi des divers modèles électromagnétiques sous forme d'équations aux dérivées partielles en se basant sur les équations de Maxwell, et du modèle thermique en régime statique et dynamique. Nous exposerons par la suite les différentes méthodes de résolution de ces équations et spécialement de la méthode des éléments finis.

Le troisième chapitre sera consacré sur un bref aperçu sur le logiciel (F.E.M.M) qui sera utilisé pour l'étude de notre application qui est un transformateur triphasé, existant déjà à Electro-industrie d'AZAZGA (ex-ENEL). Différentes simulations numériques seront présentées pour évaluer la distribution de la température dans le transformateur étudié ainsi que la température maximale.

Nous terminerons notre étude par une conclusion générale.



Chapitre I

*Généralités sur les
transformateurs*

I-1-Introduction :

Le transformateur est un appareil électrique très simple, mais il est très important dans un réseau électrique car c'est une machine de base pour le transport d'énergie électrique. Le transformateur permet de modifier la tension et le courant dans un circuit.

Le transformateur triphasé joue un rôle fondamental pour le transport et la distribution de l'énergie électrique.

Grâce à lui, l'énergie électrique peut être transportée à grande distance de façon économique et distribuée dans les usines et les maisons.

Dans ce chapitre, nous avons présentés généralement le transformateur et leurs différents types, et l'étude d'échauffement et leurs modes de refroidissements, on va parler sur Processus d'échauffement et la protection des transformateurs.

I-2- Transformateur :

I-2-1- Définition :

Un transformateur est un appareil statique à induction destinée à transformer un système de courants alternatifs en un autre système de courants alternatifs d'intensités et de tensions généralement différentes mais de même fréquence. [1]

I-2-2- Constitution :

Le transformateur est constitué de deux parties essentielles qui sont : [2]

- La partie active : elle est destinée à assurer la conversion de l'énergie.
- La partie constructive : son rôle est d'assurer la protection, la fixation, et le refroidissement de la première partie.

I-2-2-1- Partie active : elle est constituée des parties suivantes :

- A- Circuit magnétique.
- B- Les enroulements.

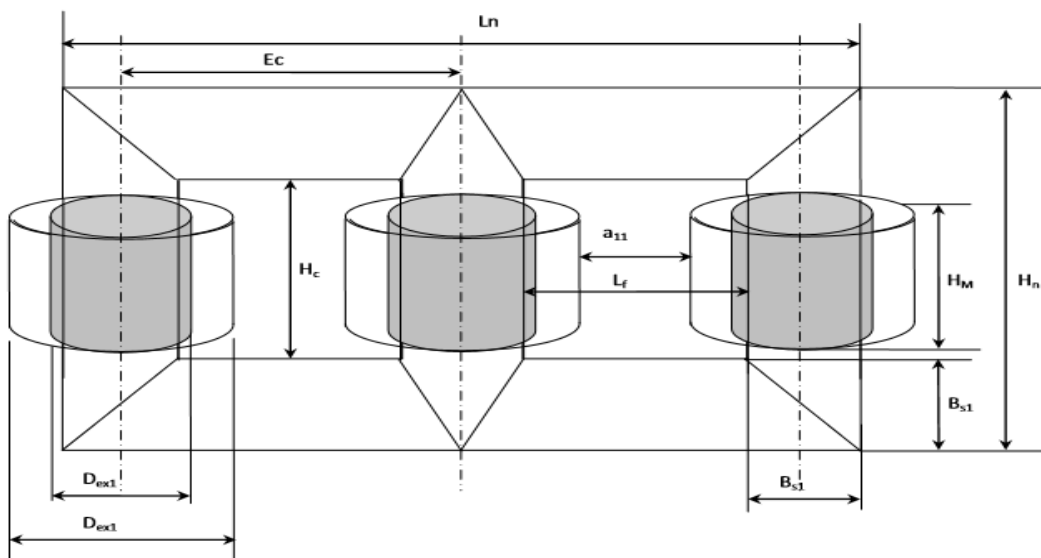


Figure I-1- Représentation de la partie active.

A - Circuit magnétique : Le circuit magnétique ou noyau comporte deux culasses et trois colonnes de même section. Il est feuilleté, c'est-à-dire formé par un empilage de tôles ferromagnétiques isolées entre elles afin de réduire les pertes par courant de Foucault.

Le circuit magnétique est soumis à un champ magnétique, il permet de canaliser le flux magnétique produit par l'enroulement primaire vers l'enroulement secondaire.

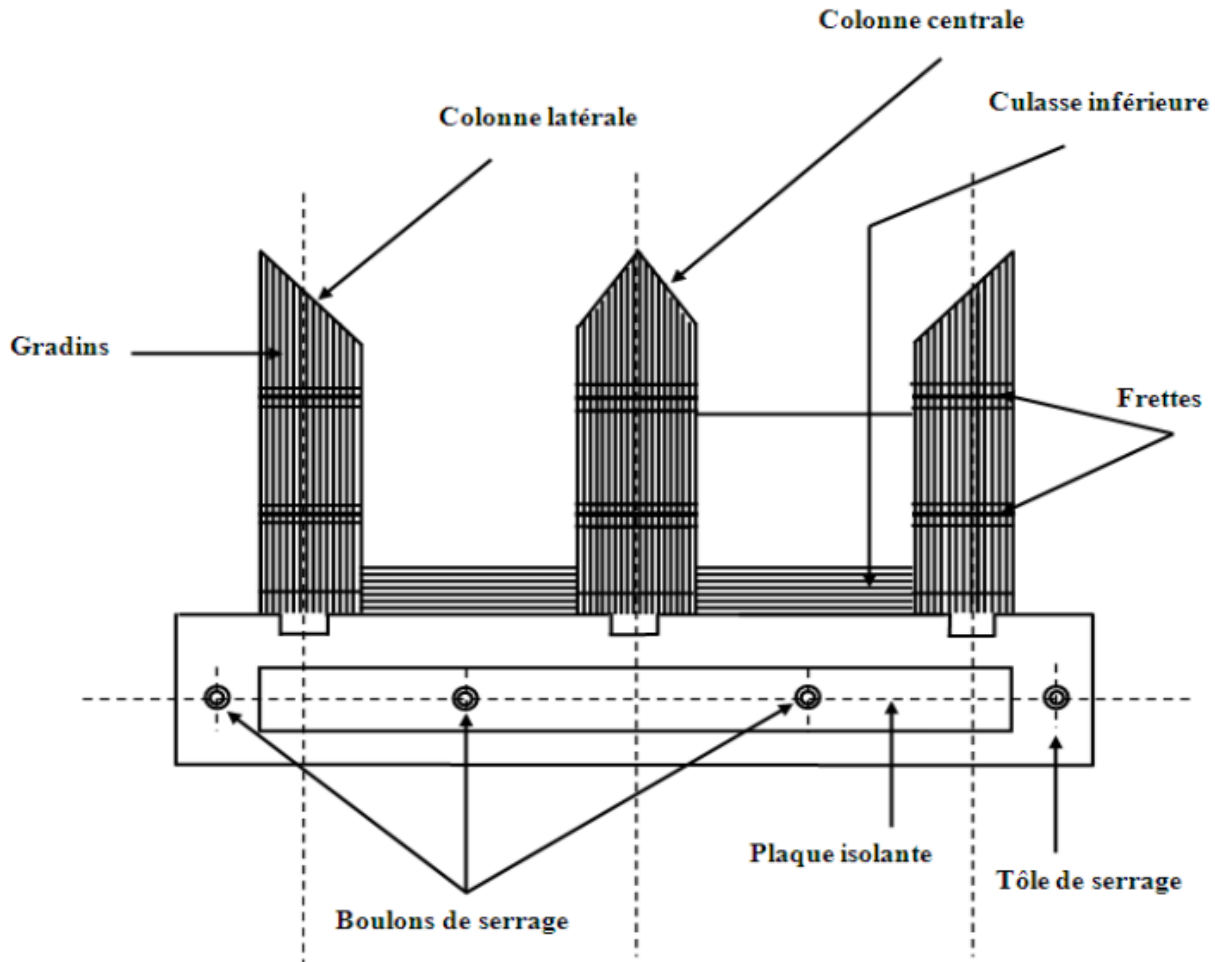


Figure I-2- Schéma de montage du noyau.

➤ **Section du noyau :**

- La section circulaire : est celle qui résiste le mieux aux efforts électrodynamiques, on est alors conduit à adopter les bobinages enroulés sur cylindre de révolution.
- Section carré : elle est employée uniquement pour les petites puissances.
- Section à un ou deux gradins : elle convient pour des puissances de quelques dizaines de kVA.
- Section à plusieurs gradins : lorsque la puissance du transformateur augmente, la section droite de la colonne croît également et l'emploi correct de la place disponible exige la multiplication des gradins.

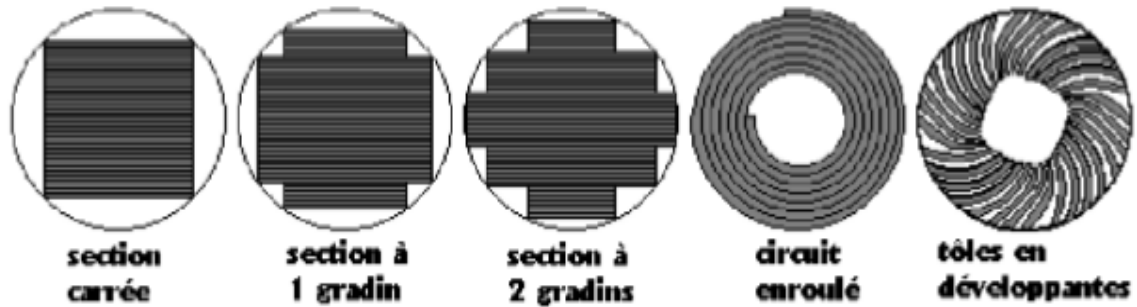


Figure I-3- Les différents noyaux de circuit magnétique.

B- Les enroulements : Les enroulements du transformateur sont les parties qui assurent, grâce aux phénomènes de l'induction électromagnétiques le transfert de puissance entre l'enroulement primaire et l'enroulement secondaire. Pour des raisons économiques, les enroulements doivent satisfaire plusieurs conditions :

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

Il existe 3 types d'enroulements qui sont déterminés en fonction de la puissance et la tension imposée par le cahier des charges, à s'avoir :

Enroulements concentriques en couche en fil rond en vernis

Enroulements concentriques en méplat isolé au papier.

Enroulements concentriques alternés en méplat isolé au papier.

Enroulements concentriques à galettes en fil rond isolé au papier.

La réalisation de bobinage s'effectue sous plusieurs formes, on trouve :

Les bobinages concentriques : Les enroulements sont constitués de deux bobines cylindriques concentriques.

Les bobinages en galettes : Les enroulements sont constitués de galettes superposées et alternées appartenant successivement au primaire et au secondaire, et séparées les unes des autres par une rondelle isolante.

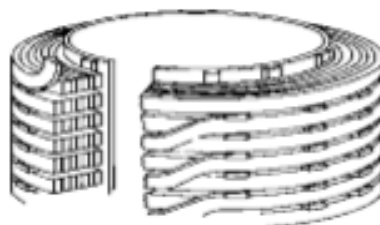


Figure I-4- Bobinages en galettes.

Les bobinages mixtes : C'est un mélange entre les deux premiers bobinages (galette et concentrique), le bobinage BT est concentrique mais l'enroulement HT est en galette.

I-2-2-2- Partie constructive : Comme il est montré à la figure suivante, cette partie comporte les éléments mécaniques suivants :

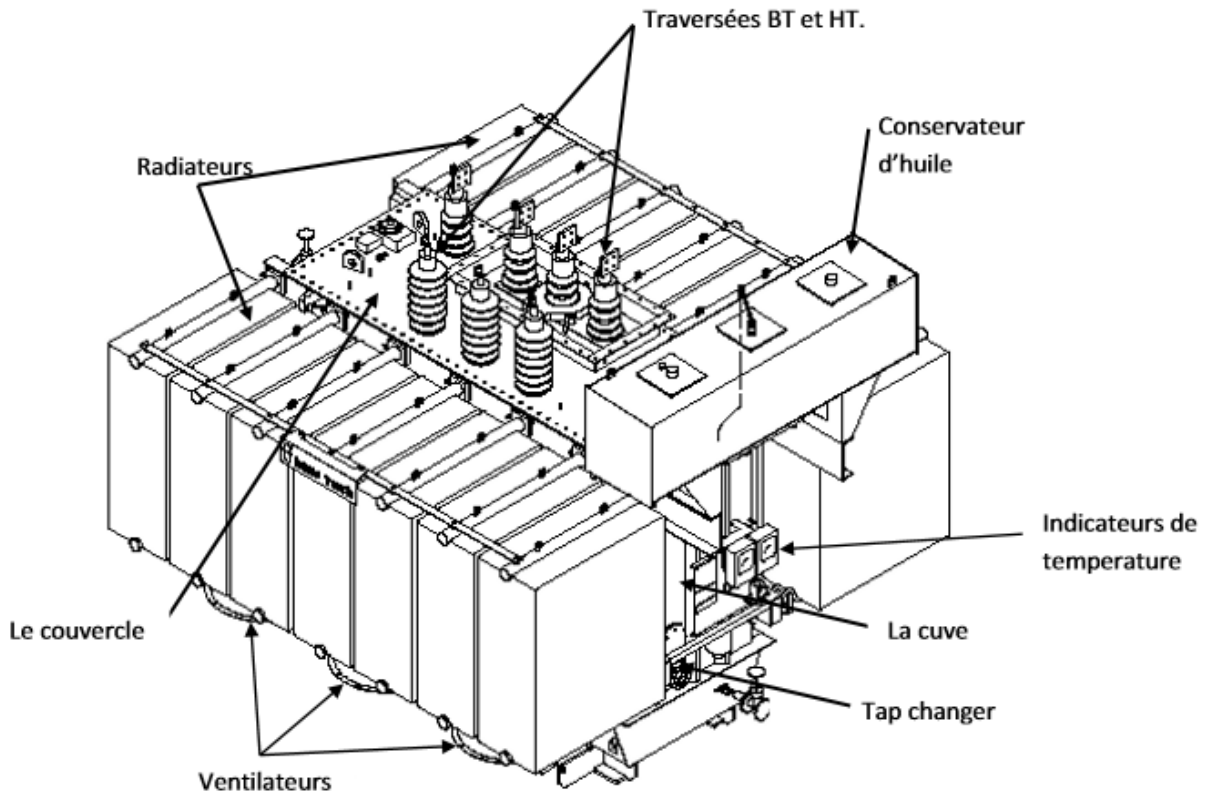


Figure I-5- Représentation de la partie constructive.

a- La cuve :

La cuve constitue l'enveloppe protectrice de la partie active, elle doit :

- Avoir une bonne résistance mécanique pour éviter toute déformation sous l'effet du poids de la partie active et de l'huile de refroidissement.
- Etre réalisée avec une grande surface d'échange de chaleur avec l'extérieur (cuve en tôles avec les ailettes).

b- Le couvercle :

Son rôle est de fermer la cuve, il représente la partie supérieure du transformateur, sur laquelle sont disposés les éléments suivants :

- Traversées basse et haute tension.
- Conservateur de l'huile.
- Collerette BT.
- Dispositif d'accrochage pour décuvage.
- Soupape de sécurité contre la surpression de la cuve.
- Thermostat de mise en marche de ventilation.
- Poche des thermomètres.

c- Le conservateur d'huile :

Il s'agit d'un réservoir qui communique à la fois avec la cuve du transformateur et l'atmosphère. Ce réservoir permet des variations de volume d'huile suivant la température. De ce fait, une faible

surface d'huile se trouve en contact avec l'air à une température inférieure à celle du transformateur, ce qui réduit le risque d'oxydation.

L'huile est un alliage d'hydrocarbure provenant de la distillation du pétrole brut continu dans la cuve. Il joue un double rôle : caloporteur et diélectrique.

d- Isolateurs de traversées :

Ils sont fixés sur le couvercle, ils sont en porcelaine et remplis d'huile, leurs rôles est d'assurer la liaison entre les enroulements et la ligne du réseau. Ceux de la BT sont soumis à une contrainte de courant, mais ceux de la HT sont soumis à une contrainte de tension.

e- Radiateurs de refroidissement d'huiles :

Ces radiateurs sont indépendants de la cuve, ils sont liés avec le transformateur par des tuyaux qui assurent la circulation d'huile dans le radiateur vers le transformateur et vice versa. La circulation de l'huile froide dans le radiateur vers le transformateur fait refroidir la partie intérieure de transformateur.

f- Changeur de prise (tap changeurs) :

Le tap changeurs du transformateur (changeur de prise) est un dispositif monté sur des transformateurs de puissance pour la régulation de la tension de sortie, ceci est obtenu en modifiant les rapports de transformation sur le système. C'est à dire en modifiant le nombre de spires dans un enroulement approprié du transformateur.

g- Assécher d'air (le dessiccateur d'air) :

Le dessiccateur d'air est un appareil à travers lequel se font les échanges avec l'extérieur. Il comprend du gel de silice (silicagel), qui change de couleur lorsqu'il est chargé d'humidité.

I-2-2-3- Le liquide diélectrique :

L'huile utilisée dans le transformateur est la BORAK 22, c'est une huile minérale provenant de la distillation du pétrole brut, après extraction des produits volatiles. On obtient ainsi pour les transformateurs, un liquide dont l'immersion de la partie active présente non seulement l'avantage d'une meilleure isolation, mais aussi celui de la facilité de refroidissement, par circulation naturelle de l'huile. [2]

I-2-3- Caractéristiques du transformateur :

Un transformateur est caractérisé principalement par : la puissance apparente, la tension primaire (tension du réseau d'alimentation), la tension secondaire, la fréquence, les couplages des enroulements, le lieu d'installation, intérieur ou extérieur, le mode de refroidissement. La puissance, les tensions, les courants, la fréquence... qui caractérisent le régime de fonctionnement auquel le transformateur est destiné par son constructeur, sont appelés paramètres nominaux. La tension nominale U_{1n} est la tension entre phases au primaire. Le courant nominal I_{1n} est le courant dans un fil de ligne d'alimentation. La puissance apparente nominale S_n est 3fois le produit des valeurs nominales de la tension et du courant. La tension secondaire U_2 dépend du courant et de la nature de la charge. De ce fait, pour exclure toute ambiguïté, on prend pour tension secondaire nominale U_{2n} , la tension secondaire à vide lorsque le primaire est alimenté sous la tension nominale. Si U_{1n} est plus grande que U_{2n} , le transformateur est dit abaisseur : le primaire est l'enroulement HT (haute tension) et le secondaire l'enroulement BT (basse tension). Par contre si U_{1n} est plus petite que U_{2n} , le transformateur est dit élévateur : son primaire est l'enroulement BT

et son secondaire son enroulement HT. Le transformateur ayant un excellent rendement, on considère que la puissance apparente nominale est la même au secondaire. Le courant nominal secondaire est alors défini comme le rapport de la puissance apparente sur 3fois la tension secondaire nominale. [3]

I-2-4- Principe de fonctionnement :

L'un des deux bobinages jouant le rôle de primaire du transformateur, est alimenté sous tension variable et donne naissance à un flux variable dans le circuit magnétique. A son tour, ce flux induit une force électromotrice dans le deuxième bobinage appelé secondaire du transformateur. Les deux bobinages étant électriquement indépendants, le transformateur réalise l'isolation galvanique entre les circuits primaire et secondaire. [4]

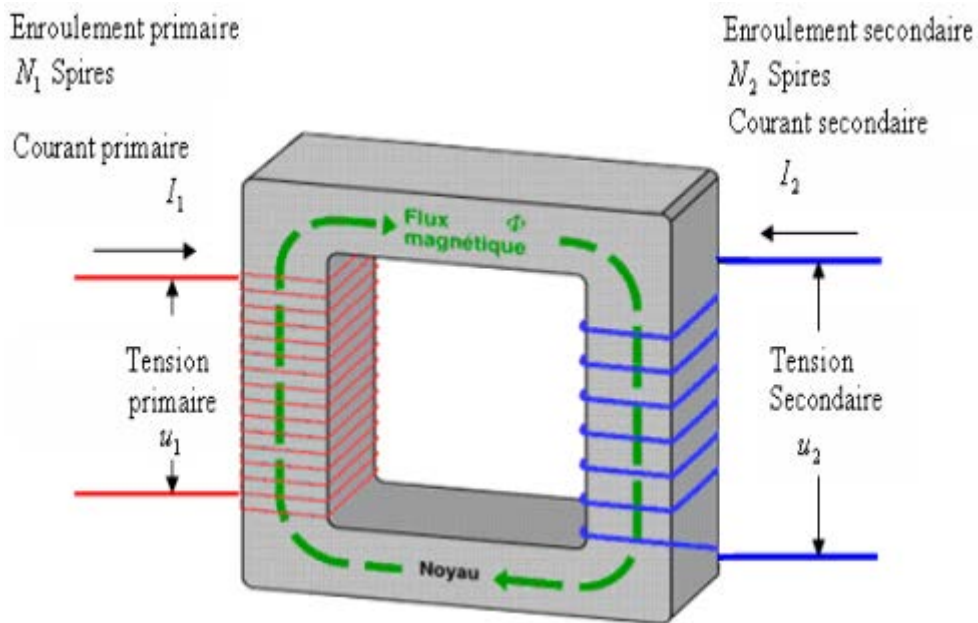


Figure I-6- Schémas de principe d'un transformateur.

Remarque :

Le transformateur ne peut pas fonctionner en régime de tension continue puisque les forces électromotrices dans les bobinages sont induites par les variations de flux. Le transformateur est réversible ; chaque bobinage peut jouer le rôle du primaire ou secondaire. [4]

I-3- Les types des transformateurs :

I-3-1- Les transformateurs spéciaux :

Généralement les transformateurs spéciaux sont utilisés pour les mesures des grandeurs électriques (courant, tension), puisqu'ils peuvent délivrer entre leurs bornes de sortie des valeurs efficaces réglable.

I-3-1-1- Transformateurs de mesure :

I-3-1-1-1- Transformateurs de courant :

Transformateurs de courant Branchés au primaire sur le réseau MT, ils délivrent au secondaire une valeur de courant réduite proportionnelle au courant du réseau sur lequel ils sont installés. Ils sont de deux types : TC, transformateur de courant, LPCT (Low Power Current Transformer) ; transformateurs de courant électronique.

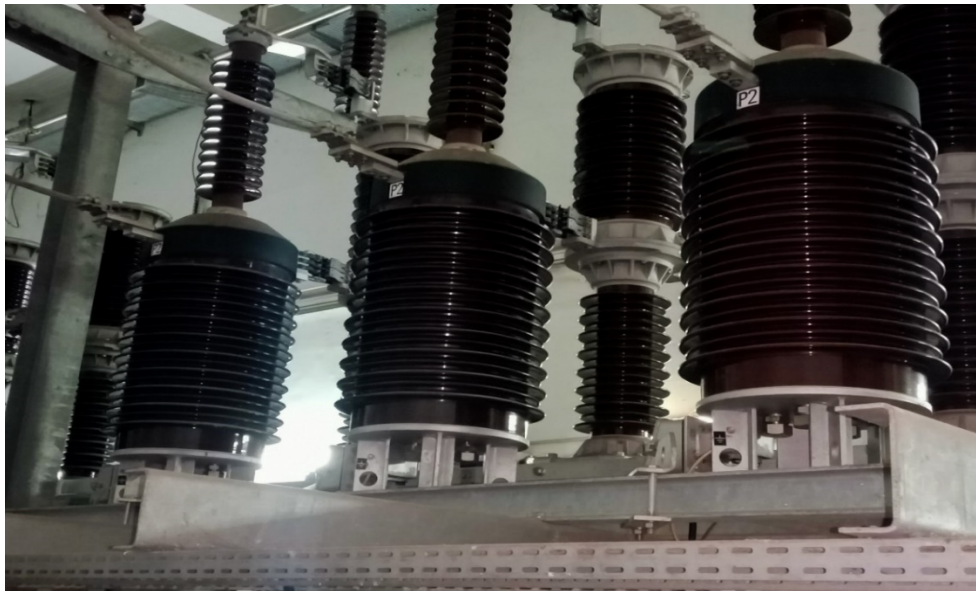


Figure I-7- Transformateurs de courant.

Les transformateurs de courant ont deux fonctions essentielles : adapter la valeur du courant MT du primaire aux caractéristiques des appareils de mesure ou de protection en fournissant un courant secondaire d'intensité proportionnelle réduite et isoler les circuits de puissance du circuit de mesure et/ou de protection.

Constitution et types : Un transformateur de courant est constitué d'un circuit primaire et d'un circuit secondaire couplés par un circuit magnétique et d'un enrobage isolant, en époxy-silice dans le cas des transformateurs Schneider Electric. L'appareil est de type : bobiné : lorsque le primaire et le secondaire comportent un bobinage enroulé sur le circuit magnétique traversant : primaire constitué par un conducteur non isolé de l'installation tore : primaire constitué par un câble isolé.

I-3-1-1-2- Transformateurs de tension :

Transformateurs de tension Branchés au primaire sur le réseau MT, ils délivrent au secondaire une valeur de tension réduite proportionnelle à la tension du réseau sur lequel ils sont installés.

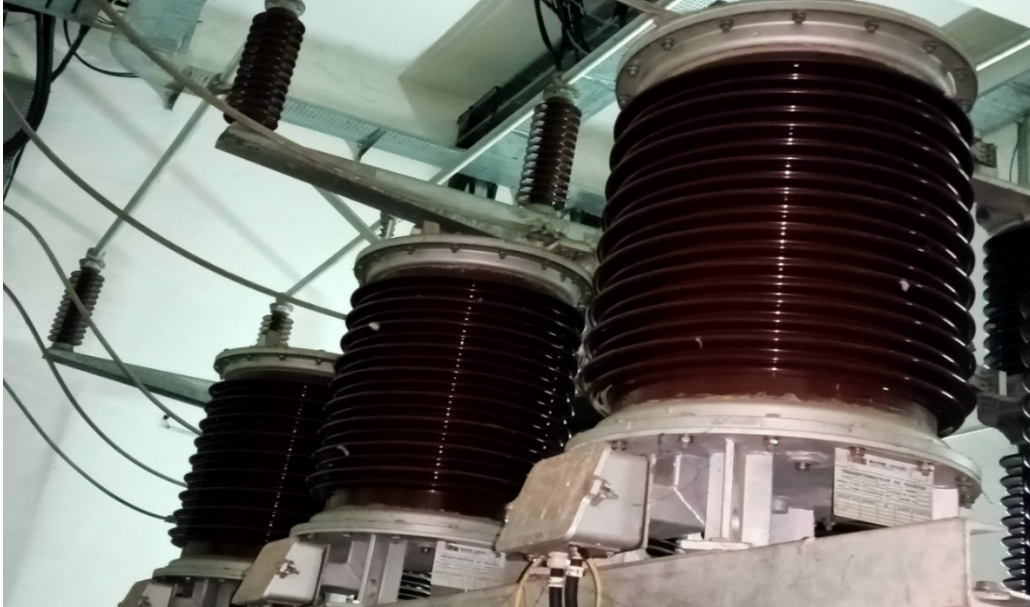


Figure I-8- Transformateurs de tension.

Les transformateurs de tension ont deux fonctions essentielles : adapter la valeur de la tension MT du primaire aux caractéristiques des appareils de mesure ou de protection en fournissant une tension secondaire proportionnelle réduite et isoler les circuits de puissance du circuit de mesure et/ou de protection.

Constitution et type : Ils sont constitués d'un enroulement primaire, d'un circuit magnétique, d'un ou plusieurs enroulements secondaires, le tout enrobé dans une résine isolante. Ils sont de deux types, selon leur raccordement : phase/phase : primaire raccordé entre deux phases phase/terre : primaire raccordé entre une phase et la terre.

I-3-1-2- Autotransformateur :

L'autotransformateur est constitué par un seul enroulement placé dans un circuit magnétique comme le montre la figure suivante :

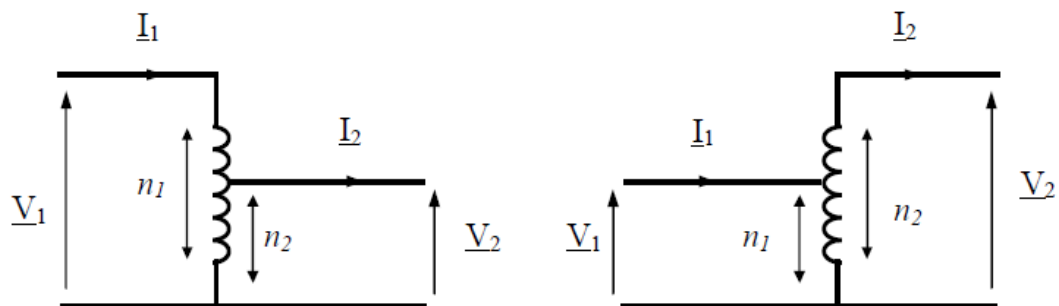


Figure I-9- Autotransformateurs.

Avantages et inconvénients :

Avantage :

- Consommation d'énergie réduite, puisque le courant à vide est presque en quadrature avec la tension.

- Réduction des pertes joules, de la chute ohmique et inductive.
- Rendement optimal du transformateur.

Inconvénients :

- Pas d'isolement galvanique entre l'entrée et la sortie.
- En triphasé, il impose le couplage étoile-étoile.

I-3-2- Transformateurs de puissance :

Un transformateur de puissance est un appareil statique à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique, transforme un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et de courant de valeurs généralement différentes à la même fréquence dans le but de transmettre de la puissance électrique » norme (IEC 60076-1, 2000). « Les transformateurs sont réversibles et permettent, soit l'élévation, soit l'abaissement de la tension ; d'où la possibilité de choisir la meilleure tension pour la production, le transport, la distribution, l'utilisation de l'énergie électrique, et de passer facilement de l'une à l'autre. » Un transformateur électrique permet donc de faire transiter la puissance électrique en courant alternatif (AC) depuis la centrale de production d'électricité jusqu'à son utilisateur final avec un minimum de pertes, à différents niveaux de tensions. Le transformateur est l'élément du réseau qui permet le passage d'une tension alternative donnée à une autre : c'est un convertisseur AC/AC à fréquence fixe, celle du réseau.

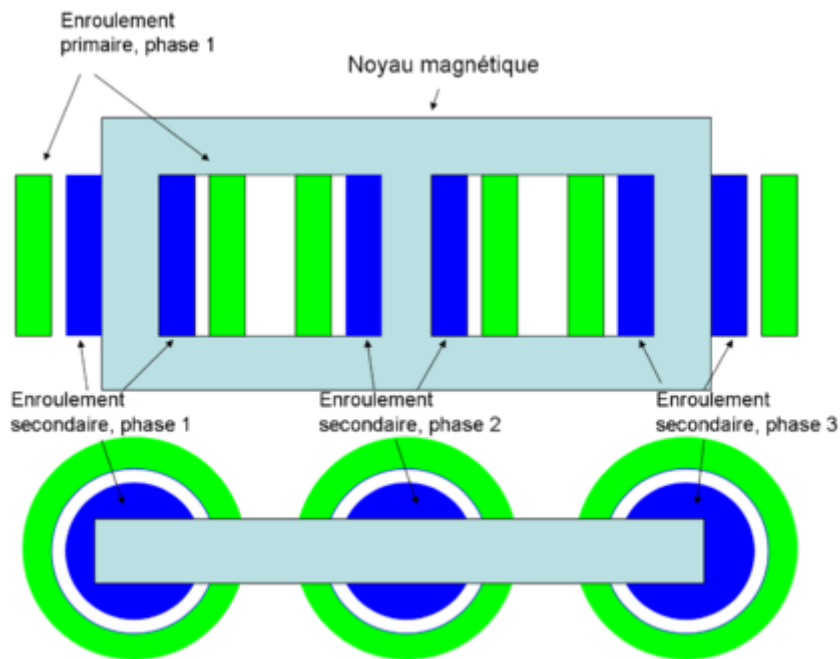


Figure I-10- transformateur de puissance.

I-3-3- Transformateurs de type sec enrobé :

Principe : refroidissement par l'air ambiant.

L'isolation des enroulements des transformateurs de type sec enrobé (ou encapsulé) est réalisée par des isolants secs. Le refroidissement est donc assuré par l'air ambiant sans liquide intermédiaire. Par exemple, les transformateurs secs enrobés de type Trihal sont réalisés à l'aide

de systèmes brevetés et exclusifs de bobinage et d'enrobage par moulage sous vide de l'enroulement HTA. Trois composants constituent l'enrobage : résine époxyde à base de biphenol A, de viscosité adaptée à une excellente imprégnation des enroulements, durcisseur anhydride (non aminé), modifié par un flexibilisateur pour assurer la souplesse du système moulé nécessaire afin d'interdire toutes fissures en exploitation charge active pulvérulente composée d'alumine tri hydratée $Al(OH)_3$ et de silice qui apporte des propriétés mécaniques et thermiques requises et les qualités intrinsèques exceptionnelles de comportement au feu des transformateurs Trihal.

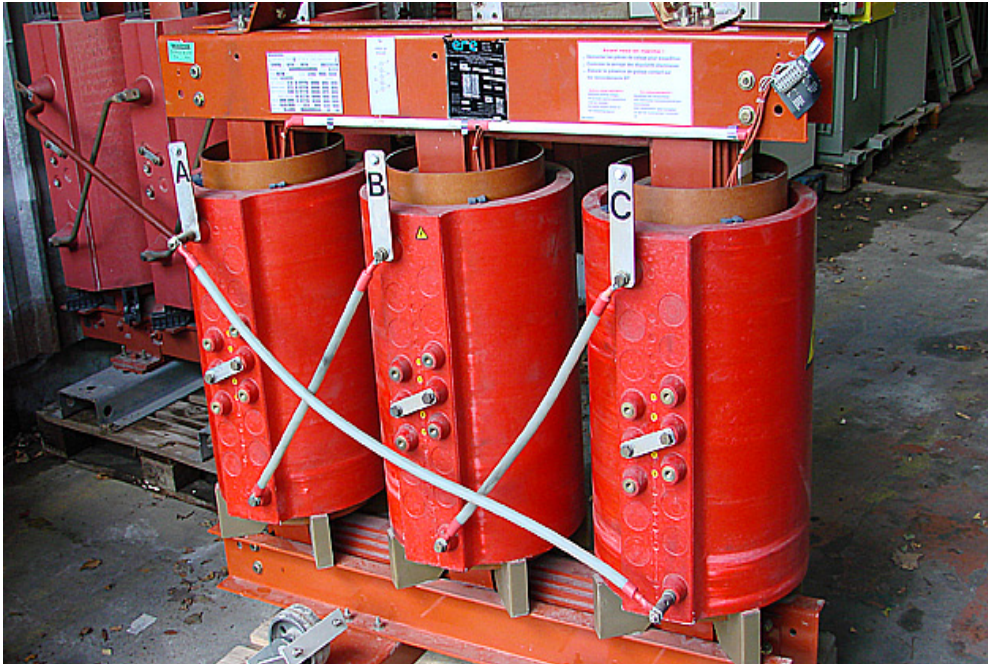


Figure I-11- Transformateur HT sec.

I-3-4- Transformateurs de type immergé :

Principe : refroidissement par diélectrique liquide.

Le liquide utilisé comme diélectrique dans les transformateurs immergés est : soit de l'huile minérale, tirée du pétrole (transformateur Minera) soit de l'huile végétale, extraite des plantes (transformateur Vegeta). Ces liquides étant inflammables, voire très inflammables dans le cas de l'huile minérale, il est recommandé de prendre des mesures de sécurité, obligatoires dans la plupart des cas dont la plus simple est le relais de protection type DMCR ou DGPT2. En cas d'anomalie, il donne l'ordre de mise hors service du transformateur avant que la situation ne devienne dangereuse. L'huile minérale est difficilement biodégradable, même sur le long terme, alors que l'huile végétale est biodégradable à 99 % en 43 jours. Elle constitue une alternative écologique, apportant de plus des performances optimisées. Le diélectrique liquide sert aussi à évacuer les calories. Il se dilate en fonction de la charge et de la température ambiante. La conception des transformateurs leur permet d'absorber les variations de volume correspondantes.

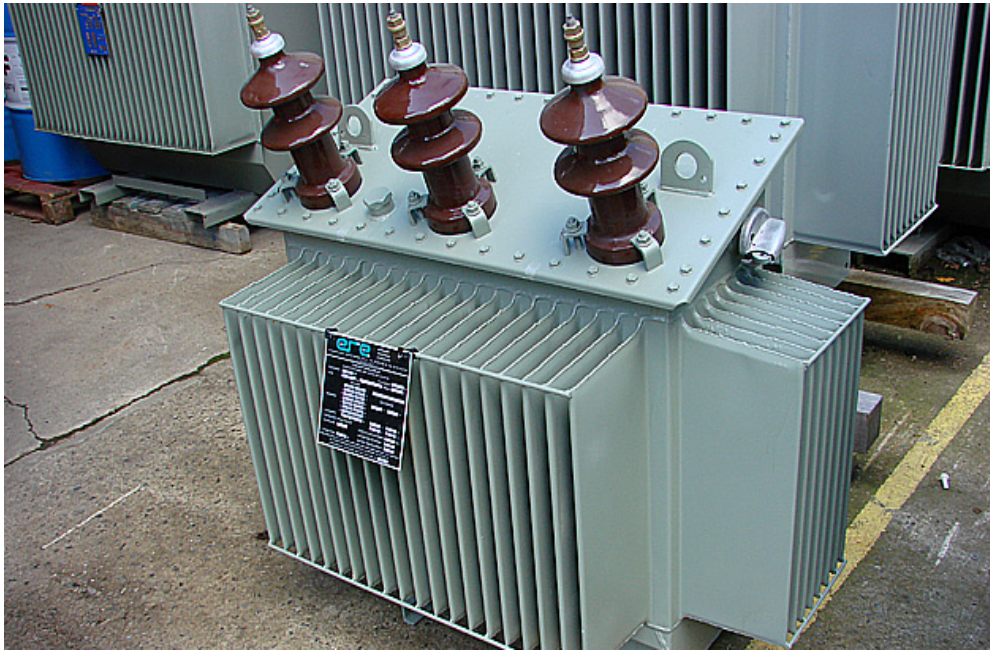


Figure I-12- Transformateur HT immergé.

I-3-5- Transformateur monophasé :

Définition :

Le transformateur monophasé est une machine électrique permettant de modifier l'amplitude des grandeurs électriques alternatives (tension, courant) sans modifier leur fréquence.

Symbole :

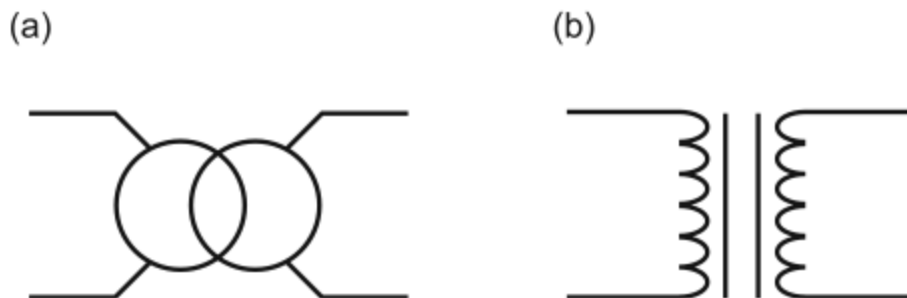


Figure I-13- symbole de transformateur monophasé.

Constitution :

Un transformateur monophasé est constitué (fig.1-14) de : (a) un circuit magnétique fermé, feuilleté et de grande perméabilité ; (b) un enroulement primaire alimenté par la source ; (c) un enroulement secondaire débitant sur les charges.

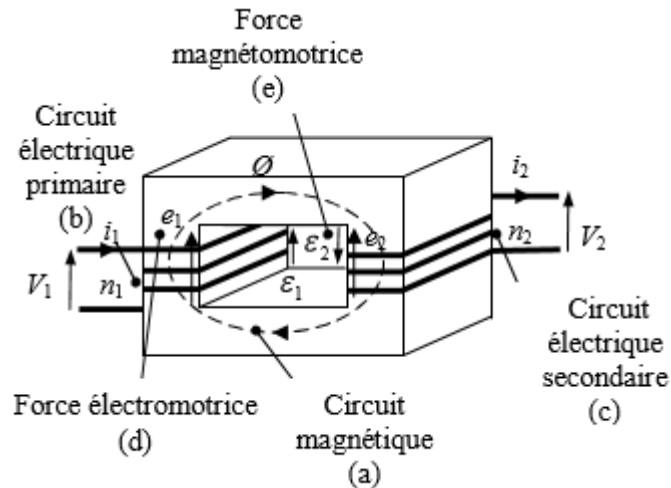


Figure I-14- Transformateur monophasé idéal.

e_1, e_2 : (f.e.m) forces électromotrices (d).

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$, (f.m.m) forces magnétomotrices (e).

Circuit équivalent d'un transformateur :

Une représentation d'un transformateur réel consiste en un transformateur idéal auquel se rattachent diverses résistances et réactances pour tenir compte des aspects réels.

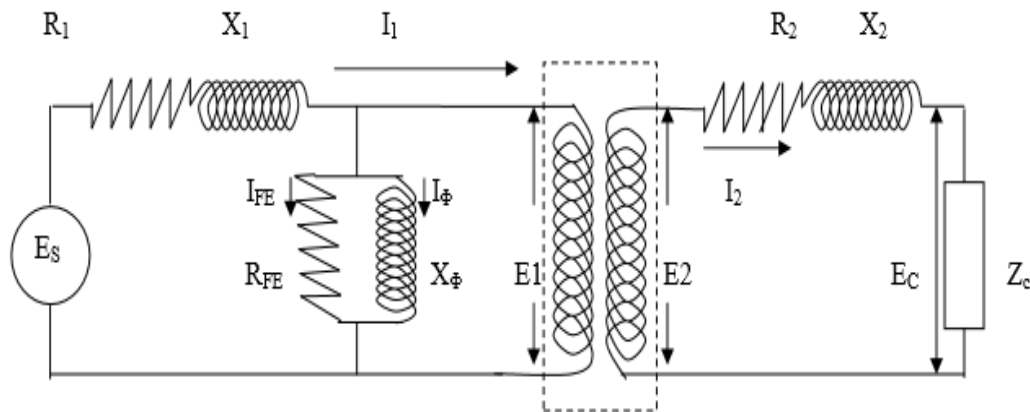


Figure I-15- Circuit équivalent d'un transformateur.

R_1, R_2 : représentent les résistances respectivement des enroulements primaire et secondaire.

R_{FE} : résistance de circuit magnétique représente les pertes par hystérésis et par courant de Foucault.

X_1, X_2 : représentent les réactances de fuite respectives des enroulements primaire et secondaire.

X_Φ : la réactance de circuit magnétique (tient compte du courant d'excitation nécessaire pour produire le flux).

E_s : la tension d'alimentation.

E_1 : f.é.m. primaire.

E_2 : f.é.m. secondaire.

E_c : La tension aux bornes de la charge.

I-3-6- Transformateur triphasé :

a- Définition : est un appareil statique à induction électromagnétique destinée à transformer un système triphasé de courants alternatifs en un autre système de courants alternatifs triphasé de même fréquence, d'intensité et de tension généralement différents, en assurant un isolement galvanique.

b- Symbole :

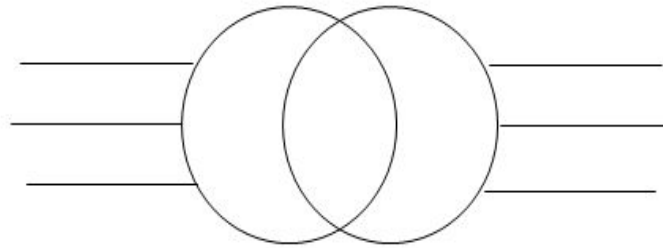


Figure I-16-Symbole transformateur triphasé.

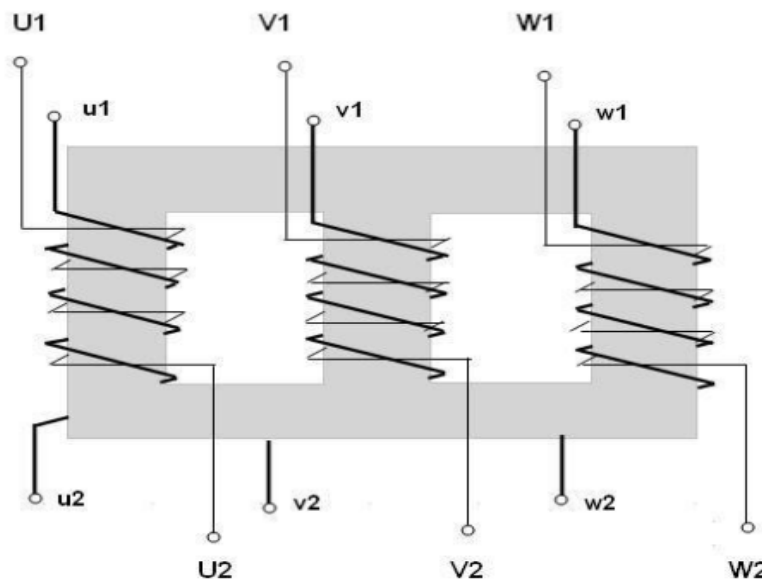


Figure I-17- Transformateur triphasé.

Les tensions simples sont v_1 , v_2 , et v_3 .

Les tensions composées sont U_1 , U_2 , et U_3 .

c- Rapport de transformation :

Le rapport de transformation d'un transformateur triphasé est le quotient de la valeur efficace de la tension simple au secondaire à vide par la valeur efficace de la tension simple au primaire, ou ce qui revient au même, le quotient de la valeur efficace de la tension composée au secondaire à vide par la valeur efficace de la tension composée au primaire.

$$m = \frac{U_{20}}{U_1}$$

d- Circuit magnétique :

Un transformateur triphasé peut être réalisé à partir de trois transformateurs monophasés. Les flux sont alors totalement indépendants. C'est une disposition parfois rencontrée pour les unités de trop forte puissance. Cependant, on emploie le plus souvent un circuit magnétique triphasé. Comme pour les bobines, celui-ci peut être symétrique ou dissymétrique, à flux libres ou à flux liés. La plupart des transformateurs triphasés utilisent la structure à trois colonnes dans le même plan (donc dissymétrique et à flux liés). Quelques appareils ont un circuit magnétique à quatre ou cinq colonnes (donc dissymétrique et à flux libres) pour améliorer le comportement en régime déséquilibré. On rencontre aussi des transformateurs triphasés cuirassés.

e- Enroulements :

Chaque colonne du circuit magnétique porte deux bobines concentriques : une phase primaire de N_1 spires et une phase secondaire de N_2 spires. Par commodité, nous représenterons des bobines séparément.

Dans certains transformateurs, trois bobines basse tension sont divisées en deux pour former six demi-bobines de $\frac{N_2}{2}$ spires, ce qui permet des possibilités supplémentaires de couplage.

f- Indice horaire :

Les systèmes de tensions du primaire et du secondaire d'un transformateur triphasé sont en générale déphasés. Conventuellement, on considère toujours le déphasage θ de la basse tension par rapport à la haute tension. Comme cet angle est toujours un multiple de $\frac{\pi}{6}$ (c'est-à-dire 30°), on définit l'indice horaire par :

$$I = \frac{\theta}{\frac{\pi}{6}}$$

Dans cette formule, l'angle θ est exprimé en radians et on choisit sa détermination positive compris entre 0 et $\frac{11*\pi}{6}$. Le nom d'indice horaire vient du fait s'il on considère le cadran d'une montre à aiguilles et que l'on place le vecteur représentant la haute tension V_a sur le nombre 12.

⚡ L'indice horaire dépend du couplage

Exemple :

Couplage **D yn 11**

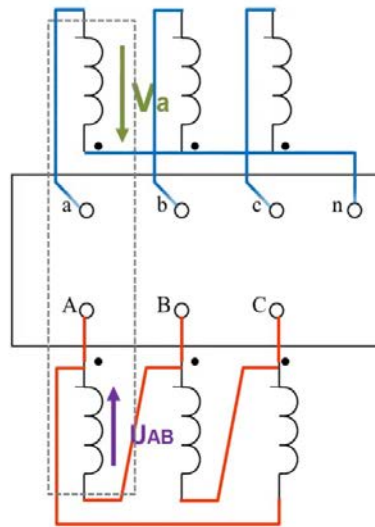


Figure I-18- Indice horaire.

g- Désignation normalisée :

Un transformateur triphasé est désigné par un symbole associant son groupe de couplage et son indice horaire. Par exemple, un transformateur triangle-étoile ayant un indice horaire est désigné par Dy11. [5]

h- Couplage normalisée :

Trois couplages sont particulièrement utilisés en pratique : ce sont les couplages normalisés Yy0, Dy11, et Yz11. [5]

I-4- Détermination des éléments du modèle-La plaque signalétique- Couplage et rendement :

I-4-1- Détermination des éléments du modèle :

L'essai à vide permet de mesurer :

$$E_s = V_{20} = \frac{U_{20}}{\sqrt{3}}$$

L'essai en court-circuit permet de déterminer :

$$R_s = \frac{P_{1cc}}{3 * I_{2cc}^2}$$

$$Z_s = m * \frac{U_{1cc}}{\sqrt{3} * I_{2cc}}$$

$$X_s = \sqrt{(Z_s^2 - R_s^2)}$$

Remarques : [6]

- La valeur efficace de la tension entre phase et neutre est V (tension simple).
- La valeur efficace entre deux phases (tension composé) est $U = \sqrt{3} * V$.
- La lettre I désigne la valeur efficace du courant dans un fil de ligne.

I-4-2- La plaque signalétique :

Elle indique la puissance apparente nominale au secondaire, la fréquence de fonctionnement et les tensions entre phases. On peut calculer les courants nominaux :

$$S_n = \sqrt{3} * U_1 * I_1 = \sqrt{3} * U_{20} * I_2$$

I-4-3- Couplage :

Les connexions des enroulements, primaires et secondaires, sont réalisées suivant la tension dont on dispose à la source et celle que l'on veut obtenir à l'utilisation. Les primaires peuvent être couplés en étoile ou en triangle, les secondaires en étoiles, triangle ou zigzag. Ce dernier couplage est utilisé lorsque les charges sont fortement déséquilibrées (récepteurs monophasés différents par exemples).

Remarques :

- a. On attribue des lettres aux couplages (Y=étoile, D=triangle, et Z=zigzag).
- b. Les lettres capitales désignent les enroulements de haute tension.
- c. On ne couple jamais le primaire en zigzag.

Le rapport de transformation $m=U_{20}/U_1$ (rapport des tensions composées secondaires à vide et primaire) dépend du nombre spires et parfois du couplage. Le tableau de la figure donne l'expression de m pour les principaux couplages.

Couplage principaux	Le rapport de transformation m
Yy	$\frac{N_2}{N_1}$
Yd	$\frac{N_2}{N_1\sqrt{3}}$
Dy	$\frac{N_2\sqrt{3}}{N_1}$
Yz	$\frac{N_2\sqrt{3}}{2N_1}$

Tableau I-1- Rapport de transformation.

I-4-4- rendement :

Le rendement (η) d'un transformateur est défini comme le rapport de la puissance active au secondaire sur la puissance active au primaire.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_j + pf}$$

Avec : $P_1 = \sqrt{3} * U_1 * I_1 * \cos\varphi_1$ (puissance au primaire, U1 tension composée)

$P_2 = \sqrt{3} * U_2 * I_2 * \cos\varphi_2$ (Puissance au secondaire U2 composée).

Les pertes sont déterminées de la même façon qu'en monophasée.

Le modèle du transformateur monophasé donné reste valable, sachant qu'il ne représente qu'une seule phase et que le transformateur triphasé en compte trois. Le modèle équivalent se détermine comme si les enroulements primaires et secondaires étaient en étoiles, même si leurs couplages réels sont différents.

I-5- Echauffement et refroidissement des transformateurs :

- 1- **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. [2]
- 2- **Le refroidissement** : Lors de son fonctionnement, un transformateur est le siège de pertes, dont la plus grande partie est localisée dans deux éléments principaux : [2]
 - a) Le circuit magnétique. Ces pertes dépendent de l'induction c'est-à-dire de la tension appliquée.
 - b) Les enroulements, Les pertes cuivre qui dépendent du courant de charge.
 En dernier lieu les flux de fuites sont susceptibles d'induire dans les pièces avoisinantes non actives (pièces de serrage, cuve, couvercle) des courants de Foucault qui entraînent des pertes parasites.

Toutes ces pertes ont pour conséquence un échauffement du transformateur, ce qui nécessite la mise en œuvre de moyens de réfrigération adéquat.

Quelques exemples des transformateurs et les méthodes d'analyses utilisées :

Matériels utilisés : on utilise les matériels suivants :

- Caméras thermiques Flir E85 et E95.
- Multimètre.

Définition des ordres de priorités :

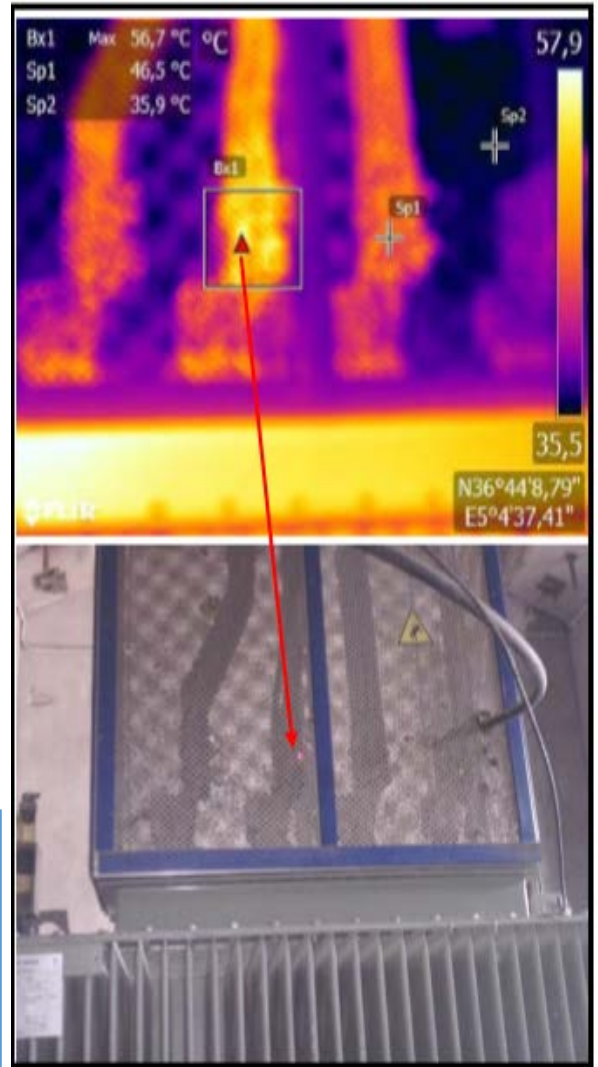
Priorité	Écart Temp.	Température max des câbles	Mesure à prendre
1	> 50°C	> 100°C	Réparation immédiate.
2	30°C à 50°C	80 à 100°C	Réparation dès que possible, dans la semaine.
3	10°C à 30°C	70°C à 80°C	Réparation lors de la prochaine routine de maintenance.

Tableau I-2- Ordres de priorités.

Des thermo-grammes pour sont enregistrées pour chacun des éléments où un écart de température supérieur à 10°C a été détecté, soit par rapport à une valeur de référence ou à un élément identique soumis à une charge de courant comparable.

Local: Poste CO2
Equipment: Transfo CO2
Composant : jeu de barres BT

Distance de prise de vue en (m)	1
Emissivité	0.85
Objectif	24°
Ambiance du local T°C	22
T°C maximale observée (Tmax)	56.7
T°C ambiance de l'équipement(T0)	-
ΔT°C Tmax - Tamb équipement	-
T°C équipement similaire	46.5
ΔT°C Tmax – T équipement sim	10.2
Charge (%)	-
T°C estimée à 100% de charge ΔT effectif = ΔT brut / (Pourcentage de charge) ²	-



Priorité

2

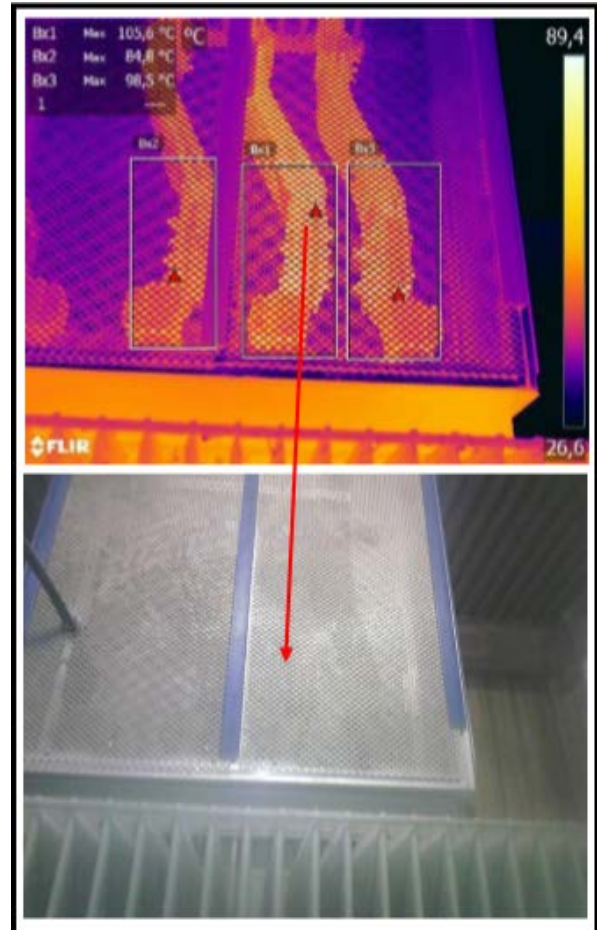
Analyse :

Anomalies constatées	Echauffement anormal de la phase N°2 du jeu de barre sortie transfo au niveau des connexions boulonnées
Analyses de(s) cause(s)	Défaut de connexion (serrage, oxydation)
Action(s) préconisé(s)	Remettre en état la connexion.

Tableau I-3- Analyse transfo CO2.

Local : Transformateur TR1 raff 3500
Sortie transfo : Jeux de barres basse tension

Distance de prise de vue en (m)	1
Emissivité	0.85
Objectif	42°
Ambiance du local T°C	26
T°C maximale observée(Tmax)	105.6
T°C équipement similaire	84.8
$\Delta T^\circ C$ Tmax – T équipement sim	20.8



Priorité

3

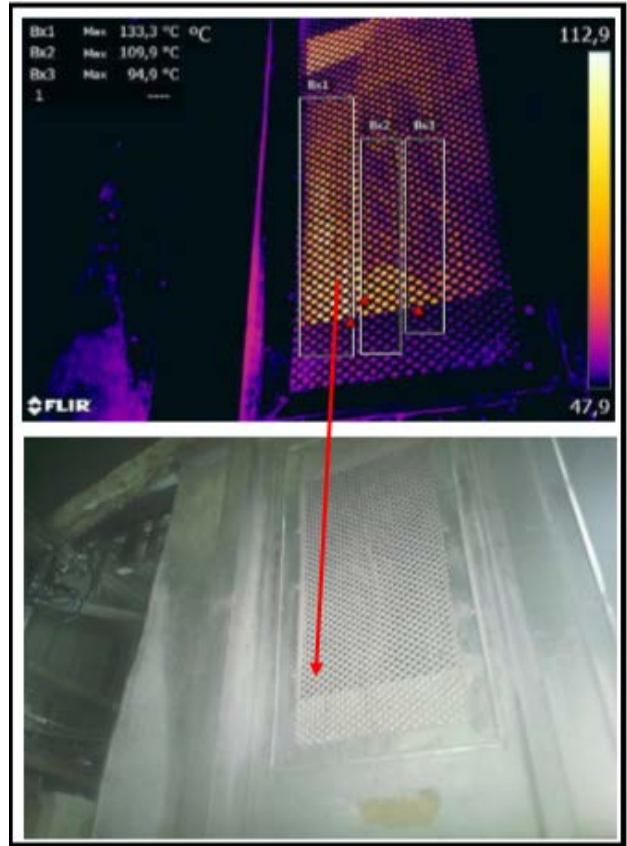
Analyse :

Anomalies constatées	Echauffement anormal du jeu de barre de la phase 2.
Analyses de(s) cause(s)	Mauvais serrage des connexions dégradation des surfaces de contact Corrosion
Action(s) Préconisé(s)	Revoir le serrage et nettoyage des jeux de barres et des surfaces de contact.

Tableau I-4- Analyse transformateur TR1 raff 3500.

Local : Transformateur TR4 raff 3000
Sortie transfo : Jeux de barres basse tension

Distance de prise de vue en (m)	1
Emissivité	0.85
Objectif	42°
Ambiance du local T°C	26
T°C maximale observée (Tmax)	133.3
T°C équipement similaire	94.9
$\Delta T^\circ C$ Tmax – T équipement sim	38.4



Priorité
2

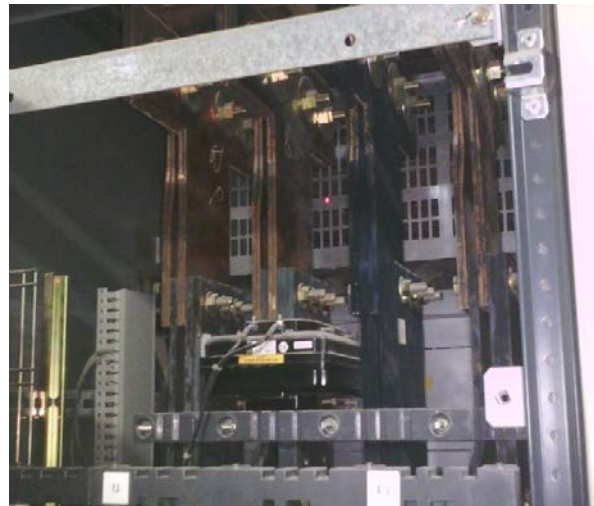
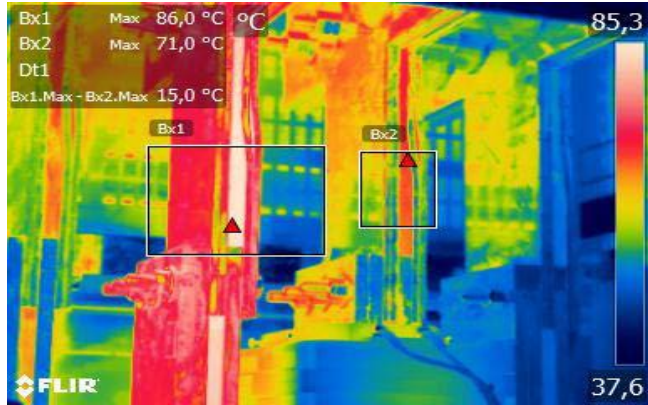
Analyse :

Anomalies constatées	Echauffement anormal du jeu de barre de la phase 1
Analyses de(s) cause(s)	Mauvais serrage des connexions dégradation des surfaces de contact Corrosion
Action(s) Préconisé(s)	Revoir le serrage et nettoyage des jeux de barres et des surfaces de contact.

Tableau I-5- Analyse transformateur TR4 raff 3000.

Local : local TGBT/transfo osmose
 Armoire : TGBT compartiment 01
 Composant : jeux de barre phase 03

Distance de prise de vue en (m)	1
Emissivité	0.85
Objectif	24°
Ambiance du local T°C	25
T°C maximale observée (Tmax)	86
T°C ambiance de l'équipement(T0)	-
$\Delta T^\circ C$ Tmax - Tamb équipement	-
T°C équipement similaire	71
$\Delta T^\circ C$ Tmax – T équipement sim	15
Charge (%)	-
T°C estimée à 100% de charge $\Delta T_{\text{effectif}} = \Delta T_{\text{brut}} / (\text{Pourcentage de charge})^2$	-



Priorité
3

Analyse :

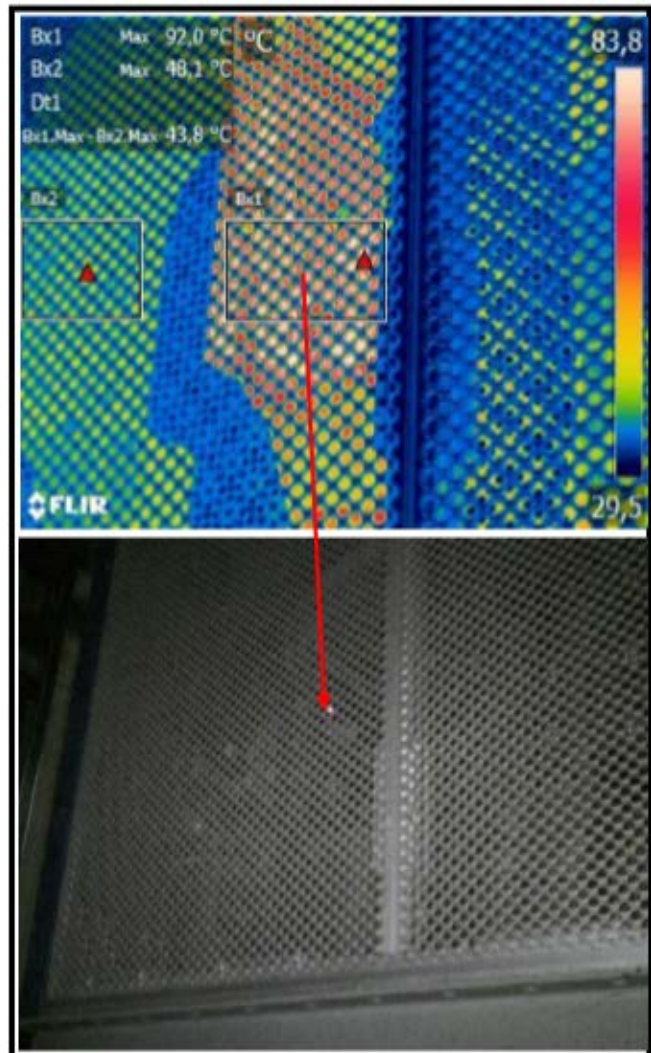
Anomalies constatées	Echauffement excessif du jeu de barre de la phase 03
Analyses de(s) cause(s)	Mauvais serrage Corrosion
Action(s) Préconisé(s)	Vérifier le serrage du jeu de barre Nettoyer et enlever les traces e corrosion

Tableau I-6- Analyse local TGBT/transfo osmose.

Local : local transfos ECDI/ELBE

Equipement : Transfos ECDI - Composant : jeux de barre

Distance de prise de vue en (m)	1
Emissivité	0.85
Objectif	24°
Ambiance du Local T°C	25
T°C maximale observée (Tmax)	92.0
T°C ambiance de l'équipement(T0)	-
ΔT°C Tmax - Tamb équipement	-
T°C équipement similaire	48.1
ΔT°C Tmax – T équipement sim	43.9
Charge (%)	-
$\Delta T_{\text{effectif}} = \Delta T_{\text{brut}} / (\text{Pourcentage de charge})^2$	-



Priorité

2

Analyse

Anomalies constatées	Echauffement dangereux du jeu de barre de la phase 02 à la sortie du transformateur. Une jonction de 04 boulons localisé sur la zone de l'échauffement peut être à l'origine de cet échauffement
Analyses de(s) cause(s)	Mauvais serrage Corrosion
Action(s) Préconisé(s)	Vérifier le serrage du jeu de barre Nettoyer et enlever les traces de corrosion

Tableau I-7- Analyse local transfos ECDI/ELB.

I-6- Modes de Refroidissement :

Le mode de refroidissement est désigné par le constructeur au moyen de quatre lettres, le tableau suivant indique la disposition des symboles : [2]

1ère lettre	2ème lettre	3ème lettre	4ème lettre
Nature du diélectrique	Mode de circulation du diélectrique	Fluide de refroidissement	Mode de circulation de fluide
O : Huile minérale L : Diélectrique chloré G : Gaz A : Air S : Isolant solide	N : Naturel F : Forcée D : Forcée et dirigée dans les enroulements	Mêmes symboles que pour la 1 ère lettre.	Mêmes symboles que pour la 2ème lettre.

Tableau I-8- Disposition des symboles.

Il existe différents modes de refroidissement d’huile à savoir : ONAN, ONAF, OFAF, ODAF.

➤ **Le système de refroidissement naturel (ONAN) :**

Ce refroidissement est assuré par l’huile qui est dans la cuve et les radiateurs munies d’ailettes pour augmenter la surface d’échanger avec le milieu extérieur. Le courant entre l’huile et les parois provoque le refroidissement de cette huile qui permet à son tour de refroidir la partie active du transformateur.

➤ **Le système de refroidissement (ONAF) :**

Ce système de refroidissement est assuré par l’huile qui est dans la cuve, les radiateurs munis d’ailettes et le système de ventilation forcée d’un important flux d’air.

Ces ventilateurs sont couplés à un système de capteurs de température faisant office de thermostat (commande automatique de la mise en route de la ventilation).

I-7- Différents types de refroidissement :

Le refroidissement peut se faire de différentes façons : [4]

a) **Refroidissement dans l’air :** Le transformateur est mis dans une enceinte grillagée, la ventilation peut être naturelle ou forcée.

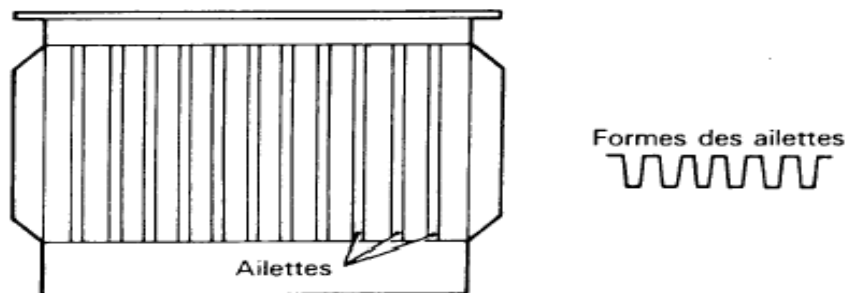


Figure I-19- Enceinte grillagée de transformateur.

b) **Refroidissement naturel dans l'huile :**

Une cuve renferme le transformateur. Cette cuve est munie d'ailettes. L'huile se refroidit au contact des parois (échange thermique).

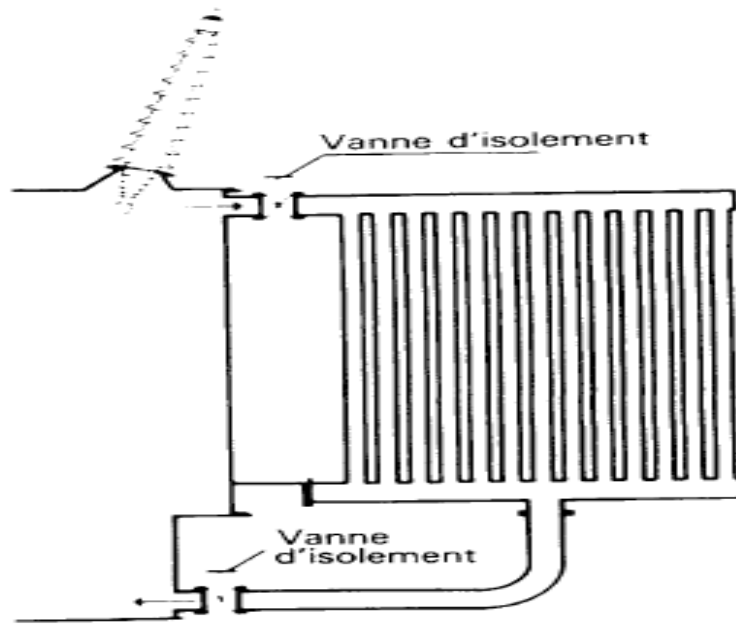


Figure I-20- Cuve du transformateur.

c) Refroidissement par radiateur d'huile :

L'huile circule naturellement dans un radiateur séparé de la cuve. Ce radiateur peut être ventilé et la circulation d'huile forcée par une pompe qui en accélère le passage.

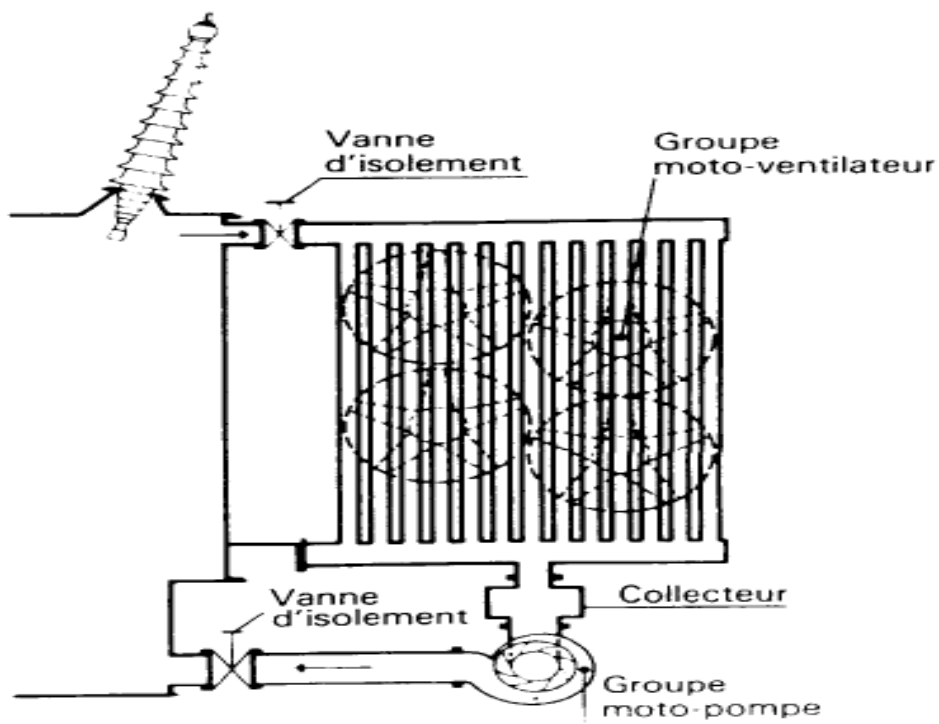


Figure I-21- Radiateur du transformateur.

d) Refroidissement avec hydro réfrigérant :

La circulation de l'huile s'effectue dans une cuve contenant des tubes à l'intérieur des quels circule de l'eau froide.

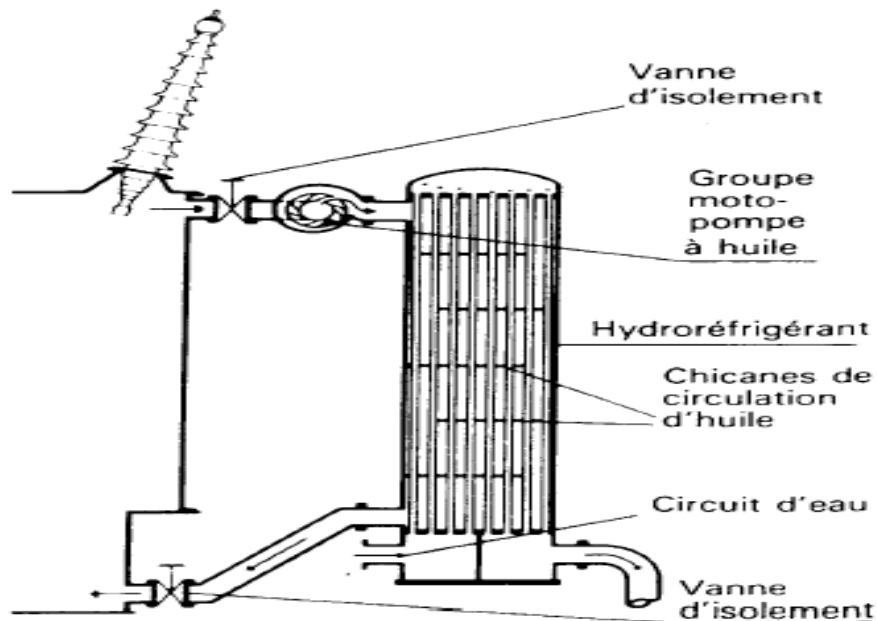


Figure I-22- Cuve contenant des tubes.

I-8- Processus d'échauffement des transformateurs :

La conversion de l'énergie dans un transformateur s'accompagne de certaines pertes. La presque totalité des pertes est libérée par effet joule dans les parties actives du transformateur c'est à dire dans son circuit magnétique et dans ces enroulements, une certaine partie des pertes de puissance se rapporte aussi aux éléments mécaniques du transformateur. Les pertes dégagées dans le transformateur lors de son fonctionnement sont transformées en énergie thermique et provoquent l'échauffement de cette partie constitutive. Depuis l'endroit où il est produit, le flux thermique est dirigé sous l'action des gradients thermiques vers les endroits où il peut être transféré à l'agent réfrigérant, c'est-à-dire, à l'air ou à l'eau selon le mode de refroidissement. La quantité de chaleur dégagée dans un transformateur correspond à une perte d'énergie. L'échauffement de transformateur est donc en fonction de ces pertes. [7]

I-9- Protection des transformateurs :

Elle dépend de type de transformateur et de la nature de l'incident. [6]

- Surtension d'origine atmosphérique, protection par les éclateurs ou parafoudre.
- Court-circuit protection en amont par détection et action très rapide de la disposition de coupure (disjoncteur ou combiné interrupteur-fusible).
- Surcharge protection thermique par le relais ou sonde thermostatique qui envoie un signal d'alarme et (où) de déclenchement de dispositif de coupure.
- Cas des transformateurs immergés, transformateurs immergés sont sujets à plusieurs défauts spécifiques :

- Un dégagement gazeux : avec le temps les isolants peuvent fuir, entraînant une pyrolyse du diélectrique et un dégagement gazeux.
- Une surpression de la cuve : conséquence d'un court-circuit.
- Une élévation de la température du diélectrique : à cause d'une surcharge ou d'un problème interne.
- Transformateur respirant, la protection interne est assurée par un relais Buchholz qui détecte un dégagement gazeux ou une fuite d'huile.
- Transformateur a remplissage intégrale, la protection interne est assurée par un module DGPT qui détecte à la fois un dégagement gazeux (DG) une augmentation de pression (P), et une augmentation de température.

Le transformateur peut être confronté à des nombreux défauts pouvant affecter son fonctionnement et provoquer la détérioration et le vieillissement de son matériel, donc des mesures de sécurité doivent être mises en place pour assurer le control en prévoit des éléments de protection interne et externe.

a- Relais Buchholz :

Le relais est un appareil sensible aux variations de grandeurs issues du réseau ou de l'élément à protéger. Son rôle est la détection des anomalies (court-circuit, mauvais contact dans les connexions, détérioration de l'isolant...etc.). Dans le cas d'apparition des conditions anormales, un dispositif se charge de transmettre l'ordre aux organes de signalisation et de commande pour l'ouverture ou la fermeture automatique d'un disjoncteur interposé dans le circuit.



Figure I-23- Relai de buchholz.

a-1- Rôle :

Les transformateurs sont des maillons très importants du réseau de distribution électrique. Ils assurent l'interface entre le fournisseur d'électricité et le consommateur qui est généralement un industriel.

Il convient donc :

- de protéger le transformateur côté « primaire » et, ce faisant, de protéger l'installation en amont. Cela évite également de continuer à alimenter un défaut important.
- de pouvoir délester le transformateur sur le « secondaire » lorsque celui-ci est utilisé au-delà de ses performances ou qu'un défaut entraîne une élévation importante de température.

a-2- Fonctions :

Au niveau du transformateur, surveillance :

Du Dégagement Gazeux...D G.

De la Pression de cuve...P.

De la Température... T2 (2 seuils).

D'où le nom de l'appareil : D G P T 2.

b- Thermomètre :

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



Figure I-24- Thermomètre.

c- Les éclateurs :

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

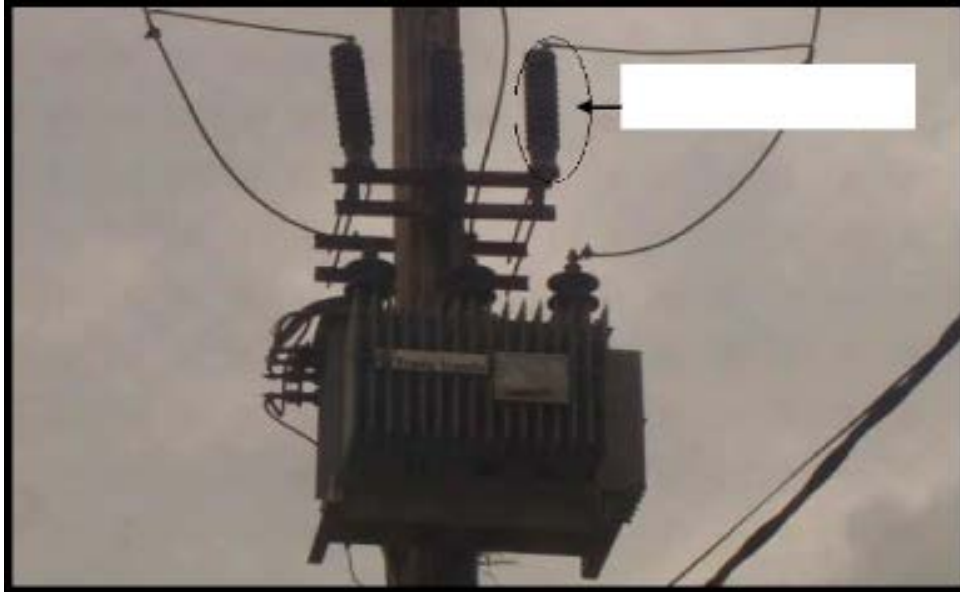


Figure I-25- Les éclateurs dans le transformateur.

d- Renforcement de l'isolation :

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

I-10- Flux de chaleur lié à un débit massique :

Lorsqu'un débit massique m de matière entre dans le système à la température T_1 et en ressort à la température T_2 , on doit considérer, dans le bilan, un flux de chaleur entrant, correspondant :

$$\varphi_e = m \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2) \quad (I.1)$$

Avec :

φ_e : Flux de chaleur entrant dans le système (W)

m : Débit massique ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

C_p : Chaleur spécifique ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

T_1, T_2 : Températures d'entrée et de sortie (K)

I-11- Stockage d'énergie :

Le stockage d'énergie dans un corps correspond à une augmentation de son énergie interne au cours du temps d'où (à pression constante et en l'absence de changement d'état) :

$$\varphi_{st} = \rho \cdot V \cdot C \cdot dT/dt \quad (II.2)$$

Avec :

φ_{st} : flux de chaleur stocké (W)

ρ : masse volumique ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

V : volume (m^3)

C : chaleur massique ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$)

T : température (°C)

t : temps (s)

I-12- Génération d'énergie :

Elle intervient lorsqu'une autre forme d'énergie (chimique, électrique, mécanique, nucléaire) est convertie en énergie thermique. On peut l'écrire sous la forme :

$$\varphi_g = P.V \quad (II.3)$$

Avec :

φ_g : flux d'énergie thermique générée (W)

P : densité volumique d'énergie générée ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

V : volume (m^3)

I-13- Conclusion :

Dans ce chapitre on a présente les deux parties essentielles des transformateurs (partie active et partie constructive), nous avons aussi donné un aperçu sur les principaux éléments qui les constituent. Ensuite, on a donné une présentation générale sur l'échauffement et les modes de refroidissement de transformateur (avec quelques exemples réels).

Nous avons terminé notre chapitre par la protection de transformateur, le flux de chaleur lié à un débit massique et stockage d'énergie.

A decorative graphic of a scroll with a green border and three grey circular elements at the corners, framing the text.

Chapitre II

*Modélisation multi-
physique des
transformateurs*

II-1- Introduction :

Au début de ce chapitre ; il est question du vieillissement des transformateurs et des contraintes (thermique et électrique) sur leur dimensionnement pour des conditions particulières d'utilisation.

Tous les phénomènes électromagnétiques sont décrits par des équations aux dérivées partielles, ces phénomènes se trouvent dans des régions de géométrie très variée parfois très complexes (exemples : machines, transformateurs, etc. ...). Les équations de Maxwell sont des lois fondamentales de la physique. Elles constituent les postulats de base de l'électromagnétisme avec l'expression de la force de Lorentz, Sur la base des équations de Maxwell, on construira les modèles électromagnétiques en régime statique (magnétostatique et électrostatique) et en régime dynamique (magnétodynamique et électrodynamique). On exposera par la suite les différentes méthodes (méthodes des éléments finis et les algorithmes numériques) de résolution de ces équations d'une manière globale.

La connaissance des champs électrique et magnétique permet d'avoir accès au calcul des grandeurs électriques et magnétiques (le potentiel vecteur magnétique, l'induction magnétique, les densités de courant et les densités de pertes), et leurs différentes formulations. Dans le reste du chapitre ; il sera question des modèles magnétiques et thermique (2D, 3D) pour la conception de transformateur ainsi que du couplage entre les deux.

II-2- Vieillessement :

Il est difficile de prévoir et même de vérifier précisément la durée de vie d'un transformateur de puissance, à cause notamment de la lenteur du processus de vieillissement. Certaines indications sur son endurance sont tout de même disponibles. En condition normale d'utilisation, la durée de vie moyenne d'un transformateur est de plusieurs dizaines d'années (typiquement supérieure à 30 ans). Pour un régime de surcharge, cette estimation chute jusqu'à quelques années, voire en deçà pour des consommateurs critiques. Des profils de charges journalières fournissent une base de calcul de ce vieillissement et des coûts d'utilisation en fonction de l'âge atteint.

Les sollicitations d'un transformateur de puissance sont nombreuses et aussi diverses que des contraintes thermique, électrique, mécanique ou environnementale (oxydation...). Les suréchauffements, les surtensions, ainsi que les variations rapides des grandeurs physiques qui leur sont associées (chocs thermiques, ...) restent pourtant les principaux facteurs de dégradation de l'isolation électrique. Celle-ci s'aggrave avec l'utilisation de charges non linéaires et est modélisable par des lois mathématiques de type exponentielles ou par des méthodes probabilistes. [8]

II-2-1 Contraintes thermiques :

Le point chaud, ou la température de l'huile au sommet de la cuve restent les grandeurs critiques de référence sur lesquelles se base la plupart des études. Le calcul de ces paramètres permet de les coupler aux équations de pertes de durée de vie.

Le type de matériau isolant employé est lui aussi étroitement lié au vieillissement, Il est soumis, au-delà des critères économiques, aux contraintes thermiques et électriques. [8]

II-2-2 Contraintes électriques :

Les phénomènes de surtension peuvent conduire à une dégradation des propriétés, voire à un claquage total ou partiel des vernis et des isolants. Dès lors, un couplage entre les sollicitations thermique et électrique est souhaitable. Pour cela l'utilisation d'une expression à base d'exponentielle est commune, mais d'autres sont également envisageables. [8]

II-3- Modèles électromagnétiques :

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-3-1- Equations électromagnétiques :

Les variations temporelles et spatiales des ondes électromagnétiques sont régies par les équations de Maxwell. Celles-ci s'appliquent sur les grandeurs électriques et magnétiques que sont : le champ magnétique H, le champ électrique E, l'induction magnétique B, le déplacement ou induction électrique D, les densités de courant J et les densités de charges électriques libres ρ_e .

II-3-1-1- Equations de Maxwell :

Les ondes électromagnétiques et plus généralement les lois de l'électricité sont régies par quatre lois locales fondamentales :

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (\text{Equation d'Ampère}) \quad (\text{II.1})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{Equation de Faraday}) \quad (\text{II.2})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{Equation de conservation du flux magnétique}). \quad (\text{II.3})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_e \quad (\text{Equation de Gauss : Conservation de charge électrique}) \quad (\text{II.4})$$

➤ Champs :

B : induction magnétique (T)

H : champs magnétique ($A.m^2$)

D : induction électrique ($C.m^{-1}$)

E : champs électrique ($V.m^{-1}$)

➤ Densité :

J : densité de courant de conduction ($A.m^{-1}$)

ρ_e : densité de charge volumique ($C.m^{-3}$)

$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$: densité de courant de déplacement ($A.m^{-2}$)

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

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (\text{II.5})$$

Les relations constitutives des matériaux et les conditions de passage complètent ces équations.

II-3-1-2- 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 :

$$D = \varepsilon \cdot E = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot E \quad (\text{II.6})$$

$$B = \mu \cdot H + B_r = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot B_r \cdot H \quad (\text{II.7})$$

$$J = J_0 + \sigma \cdot E + \varepsilon \cdot \frac{\partial E}{\partial t} \quad (\text{II.8})$$

ε , μ , σ représente respectivement la permittivité électrique, la perméabilité magnétique et la conductivité électrique du matériau. B_r représente 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 courant source.

II-3-1-3- Conditions de passage :

Les grandeurs électromagnétiques pourraient être discontinues à l'interface entre deux milieux de propriétés différentes. Les conditions de passage (ou de transmission) permettent alors d'exprimer les relations entre deux grandeurs U_1 et U_2 sur ces frontières.

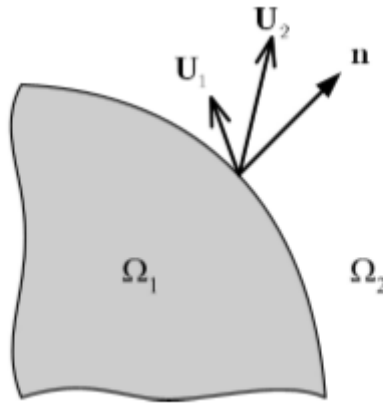


Figure II-1- Interface entre deux milieux. [8]

$$n \cdot (D_2 - D_1) = \rho_s \quad (\text{II.9})$$

$$n \cdot (B_2 - B_1) = 0 \quad (\text{II.10})$$

$$n \times (E_2 - E_1) = 0 \quad (\text{II.11})$$

$$n \times (H_2 - H_1) = K_s \quad (\text{II.12})$$

K_s et p_s sont respectivement les densités de courant et de charges surfaciques et n la normale unitaire à l'interface orientée du milieu d'indice 1 vers celui d'indice 2.

Pour K_s et p_s négligeable, les équations ci-dessus expriment une conservation des composantes normale ou tangentielle des champs associés à l'interface.

Au-delà des milieux traversés par les ondes, le domaine d'étude n'est pas infini et nécessite l'emploi de conditions supplémentaires à ses frontières.

II-3-1-4- Relations constitutives du milieu :

1- Milieu magnétique :

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (\text{II.13})$$

Avec : $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$.

μ : Perméabilité magnétique [H/m].

μ : Perméabilité magnétique du vide ($\mu = 4 \cdot 10^{-7}$).

2- Milieu diélectrique :

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad (\text{II.14})$$

Avec : $\vec{\varepsilon} = \vec{\varepsilon}_r \cdot \vec{\varepsilon}_0$

ε : Permittivité électrique [F/m].

3- Loi d'Ohm :

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{II.15})$$

Avec le terme courant de source, la loi d'ohm s'écrira :

$$\vec{J}_s = \sigma \cdot \vec{E} + \vec{J}_o \quad (\text{II.16})$$

\vec{J} : densité de courant induit [A/m^2].

\vec{J}_s : densité de courant de source [A/m^2].

σ : conductivité électrique [$\Omega \cdot m$]⁻¹.

4- Conditions aux limites :

La résolution des équations de Maxwell en particulier, ainsi que des équations aux dérivées partielles de manière générale nécessitent l'ajout des conditions aux limites associées aux problèmes étudiés. On distingue trois types de conditions aux limites :

a- Condition de Dirichlet :

Dans ce cas, le potentiel vecteur magnétique est constant sur la frontière, ce qui veut dire que l'induction magnétique est parallèle à ce contour qui présente alors une équipotentielle. On rencontre cette condition lorsqu'une partie ou tout le contour se trouve suffisamment éloigné des sources d'excitations pour pouvoir négliger les valeurs du potentiel vecteur magnétique sur la frontière par rapport aux valeurs de ce même potentiel à l'intérieur du domaine.

La condition de Dirichlet s'écrit sous la forme suivante :

$$G(u) = g_0 = \text{Constante} \quad (\text{II.17})$$

b- Condition de Neumann :

On la trouve sur les plans ou les axes d'antisymétrie magnétique, par exemple les axes inter polaires. Sur cette frontière, les lignes de l'induction magnétique sont normales, de même, lorsque ce type de condition aux limites apparait sur des axes d'antisymétries le maillage est limité à une portion de domaine.

La condition de Neumann s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{\partial G(u)}{\partial n} = g_0 \quad (\text{II.18})$$

c- Condition de type mixte :

On l'appelle condition mixte car elle est une combinaison de deux types de conditions (Dirichlet et Neumann). Cette condition est donnée comme suit :

$$G(u) + \frac{\partial G(u)}{\partial n} = g \quad (\text{II.19})$$

G : operateur différentiel.

u : fonction de l'inconnue.

g : valeur de l'inconnue sur la frontière considérée.

II-3-1-5- Conditions de jauge :

Selon la formulation retenue et le type d'éléments de discrétisation (MEF), certaines jauges sont alors préférables. Les principales jauges sont :

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (\text{Jauge de Coulomb}). \quad (\text{II.20})$$

$$\nabla \cdot U + k \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad (\text{Jauge de Lorentz}). \quad (\text{II.21})$$

II-3-1-6- Régime harmonique et état quasi stationnaire : Dans le cas des grandeurs sinusoïdales, l'opérateur de différentiation temporel, est remplacé par $j\omega$ et les équations d'ampère et de faraday se ramènent alors à la forme complexe suivante [8] :

$$\nabla \times H = J + J \cdot \omega \cdot D \quad (\text{II.22})$$

$$\nabla \times E = - J \cdot \omega \cdot B \quad (\text{II.23})$$

Les fréquences sont suffisamment faibles pour pouvoir négliger le courant de déplacement. Ainsi, étant donné les matériaux employés dans la conception de transformateur, la condition de stationnarité $\omega \ll \sigma \cdot \epsilon - 1$ est aisément vérifiée. La densité de courant est alors définie par la loi d'Ohm locale :

$$J + \frac{\partial D}{\partial t} \approx J \approx J_0 + \sigma \cdot E \quad (\text{II.24})$$

Cette densité de courant J peut se décomposer en une densité source J_o imposée, à laquelle s'ajoute une densité induite J_e dans les matériaux conducteurs.

II.3-1-7- Bilan des puissances électromagnétiques :

$$\iiint_{\Omega} E \cdot J_o^* \cdot d\Omega = \oint_{\Gamma} (E \cdot H^*) \cdot n \cdot dt - \iiint_{\Omega} \sigma \cdot E \cdot E^* \cdot d\Omega - J \cdot \omega \iiint_{\Omega} \mu \cdot H \cdot H^* \cdot d\Omega \quad (\text{II.25})$$

$$S_o = \iiint_{\Omega} E \cdot J_o^* \cdot d\Omega$$

$$S_e = \oint_{\Gamma} (E \cdot H^*) \cdot n \cdot dt$$

$$P_J = \iiint_{\Omega} \sigma \cdot E \cdot E^* \cdot d\Omega$$

$$Q_F = J \cdot \omega \iiint_{\Omega} \mu \cdot H \cdot H^* \cdot d\Omega$$

Dans cette équation, S_o , S_e , P_J et Q_F sont respectivement la puissance apparente émise par la source, celle échangée avec l'extérieur par le biais du flux associé au vecteur de Poynting, la puissance induite et dissipée par effet Joule et enfin la puissance réactive stockée dans le volume. [9]

II-3-1-8- Prise en Compte de la Saturation du Circuit Magnétique :

Les non linéarités se traduisent par une modification des relations constitutives des matériaux. Pour la perméabilité magnétique, celle-ci devient dépendante de l'induction ou du champ magnétique.

$$\mu = \mu \cdot (\| B \|) \text{ ou bien } \mu = \mu \cdot (\| H \|) \cdot \quad (\text{II.26})$$

Dans ce cas, même si le champ magnétique est sinusoïdal, l'induction ne l'est pas. Il n'est donc pas possible de remplacer les dérivées temporelles par $j\omega$. La résolution de l'équation électromagnétique doit alors se faire, en pas à pas dans le temps. Afin d'éviter de trop nombreuses itérations, il est néanmoins possible de conserver la notation complexe, en travaillant avec une courbe caractéristique du matériau dite "d'énergie équivalente".

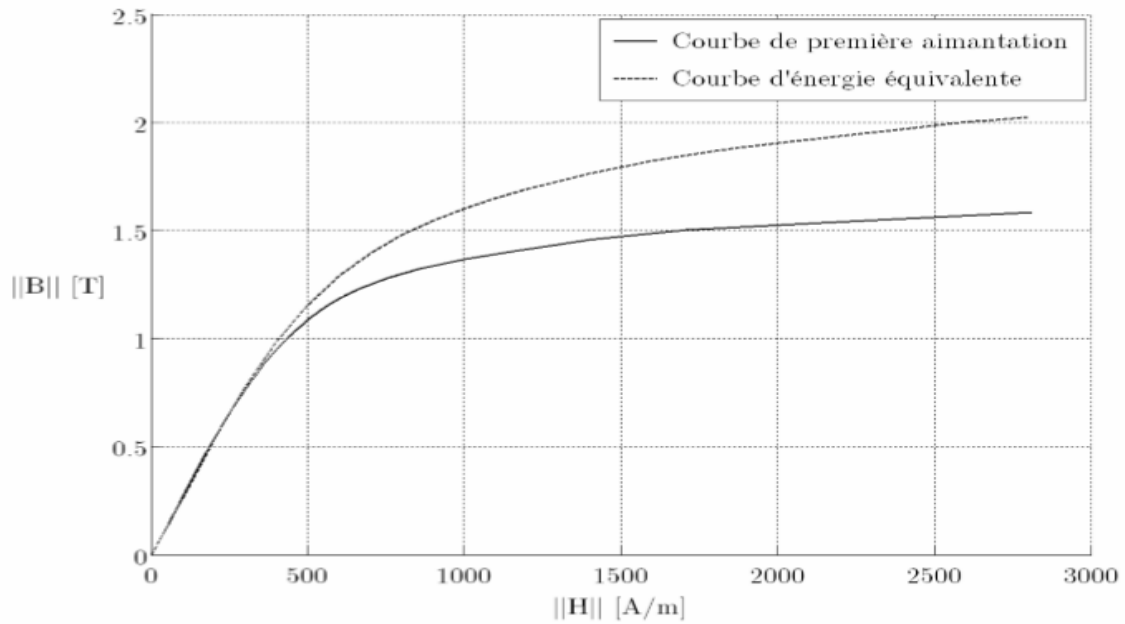


Figure II-2- Exemple de courbes de première aimantation et d'énergie équivalente.

Pour une excitation H sinusoïdale, celle-ci s'obtient, à partir de la décomposition en série de Fourier de l'induction magnétique B. [8]

II-3-1-9- Formulation bidimensionnelle en potentiel vecteur magnétique :

$$\overrightarrow{rot} (\overrightarrow{vrot} \vec{A}) = - \overrightarrow{div} (\overrightarrow{vgrad} \vec{A}) + \overrightarrow{grad} (\overrightarrow{vdiv} \vec{A}) \quad (II.27)$$

$$\text{Avec } v = \frac{1}{\mu} \quad (II.28)$$

En adoptant la condition de jauge de coulomb, l'équation (II.26) devient :

$$\overrightarrow{rot} (\overrightarrow{vrot} \vec{A}) = - \overrightarrow{div} (\overrightarrow{vgrad} \vec{A}) - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{J}_s \quad (II.29)$$

Si on considère que la source est harmonique sinusoïdale l'équation (II.28) s'écrit :

$$- \overrightarrow{div} (\overrightarrow{vgrad} \vec{A}) + \sigma j \omega \vec{A} = \vec{J}_s \quad (II.30)$$

a- Formulation 2D cartésien : dans le cas d'un problème 2D cartésien (x,y), le potentiel vecteur \vec{A} et la densité de courant \vec{J} n'ayant qu'une seule composante suivant oz. Ces derniers sont de la forme :

$$\vec{A} = (0,0,A_z) \text{ et } \vec{J} = (0,0,J_{sz})$$

En coordonnées cartésien nous avons :

$$\overrightarrow{rot} \vec{A} = \begin{bmatrix} \vec{e}_l & r\vec{e}_l & \vec{e}_k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & 0 & A_z \end{bmatrix} \quad (II.31)$$

$\vec{e}_i, \vec{e}_j, \vec{e}_k$: vecteur unitaire.

$$\overrightarrow{rot} \vec{A} = \left[\frac{\partial(A_z)}{\partial y} \right] \vec{e}_i + \left[-\frac{\partial(A_z)}{\partial x} \right] \vec{e}_j \quad (\text{II.32})$$

$$\overrightarrow{rot} \vec{A} = \left[\frac{\partial(A_z)}{\partial y} \right] \vec{e}_i + \left[-\frac{\partial(A_z)}{\partial x} \right] \vec{e}_j \quad (\text{II.33})$$

$$\overrightarrow{rot} \vec{A} (\overrightarrow{vgrad} \vec{A}) = \left[-\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial(A_z)}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial(A_z)}{\partial y} \right) \right] \vec{e}_z \quad (\text{II.34})$$

L'équation (II.29) devient :

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial(A_z)}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial(A_z)}{\partial y} \right) = -\sigma j \omega \vec{A} + \vec{J}_{sz} \quad (\text{II.35})$$

b- Formulation 2D axisymétrique :

Dans le cas d'un problème 2D axisymétrique (r,z), le potentiel vecteur magnétique \vec{A} et la densité de courant \vec{J} n'ayant qu'une seule composante azimutale.

$$\vec{A} = (0, A_\theta, 0) \quad \text{et} \quad \vec{J} = (0, J_{s\theta}, 0)$$

En coordonnées cylindriques axisymétrique nous avons :

$$\overrightarrow{rot} \vec{A} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \vec{e}_i & r\vec{e}_i & \vec{e}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & r\vec{e}_\theta & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

$$\overrightarrow{rot} (\overrightarrow{vrot} \vec{A}) = \left[-\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial(A_z)}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial(A_z)}{\partial y} \right) \right] \vec{e}_\theta \quad (\text{II.37})$$

L'équation (II.37) devient :

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial(A_z)}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial(A_z)}{\partial y} \right) = -\sigma j \omega \vec{A} + \vec{J}_{s\theta} \quad (\text{II.38})$$

II-3-2- Phénomènes et modèles électromagnétiques :

Généralement un dispositif électromagnétique comporte plusieurs matériaux dont certains ont des caractéristiques non linéaires par ailleurs les phénomènes électromagnétiques varient fortement au sein de la structure, c'est pour cela que l'analyse de la structure en trois dimensions (3D) s'avère coûteuse en terme de temps et de calcul, d'autre part l'analyse à une dimension (1D) est moins représentative. L'emploi des modèles à deux dimensions (2D) est particulièrement simple et efficace, et son choix est réaliste.

Pour pouvoir effectuer une analyse significative sur les phénomènes électromagnétiques, il faudrait élaborer les modèles électromagnétiques sous formes d'équations aux dérivées partielles qu'on pourrait ensuite résoudre par différentes méthodes. On aura donc à faire avec quatre modèles en coordonnées cartésiennes.

A partir de la troisième équation de Maxwell, on pourra introduire une équation en termes de

potentiel vecteur magnétique \vec{A} tel que :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \Rightarrow \quad \vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \quad (\text{II.39})$$

II-3-2-1- Modèle magnétostatique :

Pour ce modèle, on tiendra compte d'aucune variation des grandeurs par rapport au temps

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} = 0\right)$$

D'où, les équations de Maxwell s'écrivent comme suit :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = 0 \quad (\text{II.40})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{II.41})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{j} \quad (\text{II.42})$$

$$\text{Sachant que : } \vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) = -\Delta \vec{A} + \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) \quad (\text{II.43})$$

En introduisant la condition de Jauge de Colombe : $\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0$

et cela pour assurer l'unicité de la solution nous aurons :

$$\vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) = -\Delta \vec{A} \quad (\text{II.44})$$

D'après l'équation (II.14), nous avons :

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu}$$

$$\text{D'où l'équation (II.41) devient : } \vec{\nabla} \wedge \frac{\vec{B}}{\mu} = \vec{j} \quad (\text{II.45})$$

En considérant que les propriétés physiques des milieux sont linéaires (la saturation est négligeable),

$$\text{L'équation (11) devient : } \vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) = \mu \cdot \vec{j} \quad (\text{II.46})$$

En faisant la soustraction entre les équations (II.40) et (II.42) nous aurons :

$$\Delta \cdot \vec{A} = \mu \cdot \vec{j} \quad (\text{II.47})$$

$$\text{Lorsque : } A = \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ A_z \end{matrix}$$

On obtient dans le cas d'une seule composante :

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu \cdot \vec{j} \quad (\text{II.48})$$

$$\text{D'où : } \Delta \cdot \vec{A} = \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2}$$

Et \vec{J} est la densité des courants de conduction.

Sachant que :

$$\vec{J} = \vec{J}_s - \sigma \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

Avec \vec{J}_s est la densité des courants de source et $\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = 0$ car il s'agit d'un phénomène statique.

L'équation finale sera alors :

$$\frac{\partial^2 Az}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Az}{\partial y^2} = -\mu \cdot J_s \quad (\text{II.49})$$

L'équation (II.49) représente l'équation aux dérivées partielles en terme de potentiel vecteur magnétique du modèle magnétostatique 2D.

II-3-2-2- Modèle magnétodynamique :

L'équation que nous allons établir s'applique aux dispositifs électromagnétiques dans lesquels il y a présence des courants induits provenant de la variation du champ dans le temps

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} \quad (\text{II.50})$$

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \quad (\text{II.51})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.52})$$

Les relations (II.51) et (II.52) nous permettent d'écrire :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} + \frac{\partial (\vec{\nabla} \wedge \vec{A})}{\partial t} = 0 \quad (\text{II.53})$$

D'où :

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \quad (\text{II.54})$$

Il existe un potentiel scalaire V tel que :

$$\left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = - \vec{\nabla} \cdot V \quad (\text{II.55})$$

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E}$$

$$\text{Sachant que : } J_s = - \sigma \cdot \vec{\nabla} \cdot V \quad (\text{II.56})$$

$$\text{On a aussi : } \vec{J} = J_s - \sigma \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{II.57})$$

En remplaçant (II.51) et (II.53) dans (II.17) nous aurons :

$$\vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) + \sigma \cdot \mu \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \mu \cdot J_s \quad (\text{II.58})$$

L'équation (II.58) exprime l'équation aux dérivées partielles avec le terme source dans le cas magnétodynamique sans courants de déplacement de type parabolique, qui traduit le phénomène de pénétration des courants induits.

La condition de Jauge de LORENTZ ($\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0$) qui assure l'unicité de la solution, nous permet d'écrire :

$$\vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) = -\Delta \cdot \vec{A} \quad (\text{II.59})$$

En remplaçant (II.59) dans (II.58) on obtient :

$$-\Delta \cdot \vec{A} + \sigma \cdot \mu \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \mu \cdot J_s \quad (\text{II.60})$$

En hypothèse deux dimensions et dans le plan [x, y], l'équation (II.60) devient :

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} - \sigma \cdot \mu \frac{\partial A_z}{\partial t} = -\mu \cdot J_{sz} \quad (\text{II.61})$$

L'équation (II.61) représente l'équation aux dérivées partielles en termes de potentiel vecteur magnétique avec le terme source de modèle magnétodynamique.

En régime harmonique, le terme $\frac{\partial}{\partial t}$ est remplacé par $j\omega$, l'équation (II.61) devient :

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} - j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \mu \cdot A_z = -\mu \cdot J_{sz} \quad (\text{II.62})$$

Où : $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

ω : la pulsation des courants.

f : la fréquence est égale à 50 Hz.

II-3-2-3- Modèle électrostatique :

On pose : $\frac{\partial}{\partial t} = 0$

D'après les deux équations de Maxwell et la relation de milieu suivantes nous déduisons que :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{II.63})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = 0 \quad (\text{II.64})$$

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (\text{II.65})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = 0 \Rightarrow \exists V / \vec{E} = -\vec{\nabla} \cdot V \quad (\text{II.66})$$

Le champ électrique s'exprime sous forme de dérivée première d'un potentiel scalaire V.

En remplaçant les relations (II.66) et (II.65) dans (II.63) nous aurons :

$$\vec{\nabla} \cdot (-\vec{\nabla} \cdot V) = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (\text{II.67})$$

Comme :

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \cdot V) = \Delta \cdot V \quad (\text{II.68})$$

D'où :

$$-\vec{\nabla} \cdot \vec{V} + \frac{\rho}{\varepsilon} = 0 \quad (\text{II.69})$$

En hypothèse deux dimensions, l'équation (II.69) devient :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\rho}{\varepsilon} = 0 \quad (\text{II.70})$$

La relation (II.70) exprime l'équation aux dérivées partielles en termes de potentiel scalaire électrique V de modèle électrostatique.

II-3-2-3- Modèle électrodynamique :

En hypothèse électrodynamique les deux équations de Maxwell, la loi d'Ohm et la relation de milieu magnétique à considérer sont :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.71})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.72})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.73})$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.74})$$

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \vec{J}_{ind} = -\sigma \vec{\nabla} V + S \vec{E} \quad (\text{II.75})$$

A partir des équations (II.71) et (II.73) on peut écrire :

$$\vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{E}) + \mu \frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \wedge \vec{H}) = 0 \quad (\text{II.76})$$

En introduisant l'équation (II.72) dans (II.76) on obtient :

$$\vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{E}) + \mu \frac{\partial}{\partial t} (\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) = 0 \quad (\text{II.77})$$

$$\text{Sachant que : } \vec{J} = \vec{J}_s + \vec{J}_{ind} = -\sigma \vec{\nabla} V + S \vec{E}$$

$$\vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{E}) + \mu \frac{\partial}{\partial t} (-\sigma \vec{\nabla} V + S \vec{E} + \frac{\partial (\varepsilon \vec{E})}{\partial t}) = 0 \quad (\text{II.78})$$

Alors :

$$\vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{E}) + \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \mu \sigma \frac{\partial \vec{\nabla} V}{\partial t} \quad (\text{II.79})$$

La relation (II.79) exprime l'équation aux dérivées partielles en termes de champ électrique \vec{E} en hypothèse deux dimensions cartésiennes avec le terme source en régime transitoire.

II-4- Modèle thermique :

Le modèle thermique utilisé est un modèle plus complet, mais aussi plus coûteux. Des hypothèses de modélisation sont donc tout de même nécessaires à l'implémentation et à la résolution des équations thermiques en 3D.

II-4-1-1- Hypothèses de modélisation :

L'équation caractéristique à résoudre en régime permanent pour le cas cartésien 3D s'écrit :

$$\lambda_x \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \eta \cdot \rho \cdot J \cdot J^* + P_j \quad (\text{II.80})$$

Les pertes supplémentaires sont toujours négligées et les pertes fer P_f sont identifiées à partir de la distribution de l'induction magnétique dans le noyau. Pour un exposant de Steinmetz égal à 2, à partir des pertes mesurées lors de l'essai à vide.

Le transformateur d'essai est un modèle sec de 10kVA et non imprégné. Les conducteurs sont homogénéisés par couches et les différentes feuilles isolantes entre chaque couche sont maillées. Un facteur d'espacement η est donc introduit dans l'équation (II.84) de manière à conserver des pertes Joule identiques dans le bobinage. Celui-ci est désormais calculé par un rapport entre les volumes des conducteurs réels et homogénéisés.

Les couches d'air mince sont maillées et caractérisées par un échange de chaleur par conduction. Il s'agit du mince canal séparant les bobinages primaires et secondaires, de l'espace entre les têtes de bobine et les culasses magnétiques, ou encore de celui existant entre les bobinages de chaque colonne.

L'équation (II.80) est complétée des conditions aux limites par convection et rayonnement et résolue numériquement par MEF.

II-4-1-2- Choix des paramètres :

La modélisation tridimensionnelle de l'échange par conduction nécessite la connaissance de trois conductivités, voire d'un tenseur pour certains détails géométriques.

Les coefficients de convection sont pour toutes les parois des coefficients moyens (enroulements et noyau), à l'exception des coefficients sur les surfaces verticales des bobinages qui sont eux définis localement.

II-4-1-2-1- Conductivités thermiques dans le noyau :

Le noyau anisotrope est constitué d'un empilage de tôle conductrice isolé entre elles et doit être caractérisé par deux conductivités. Une première axiale $\lambda(x,z)$ dans le sens du laminage et une seconde radiale $\lambda(y)$ dans le sens de l'empilement.

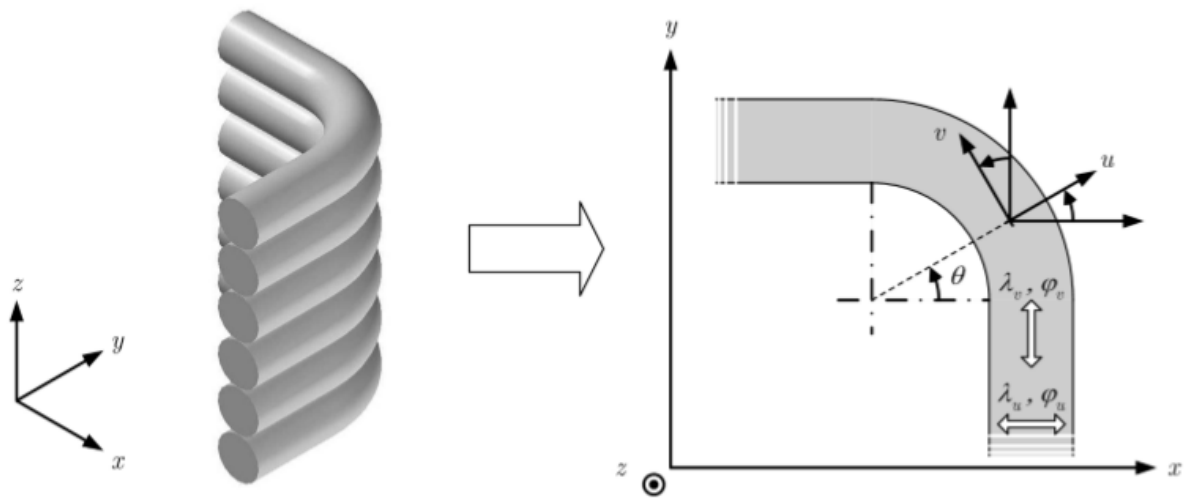
Les deux conductivités de ce matériau composite peuvent s'exprimer à partir de celle issue d'un enroulement en feuillard homogénéisé, ou d'une manière plus directe et analogue à celle employée pour la perméabilité magnétique, à partir du coefficient de foisonnement F . Pour des tôles de conductivités λ_f , séparé par une pellicule isolante (oxyde) ayant une conductivité λ_i , on obtient :

$$\lambda(x, y) = \lambda_f \cdot F + \lambda_i \cdot (1 - F) \approx \lambda_f \quad (\text{II.81})$$

$$\lambda(y) = \frac{\lambda_f \cdot \lambda_i}{\lambda_f \cdot (1 - F)} \quad (\text{II.82})$$

II-4-1-2-2- Tenseur de conductivités thermique :

La modélisation tridimensionnelle de l'échange par conduction nécessite la connaissance de chacune des conductivités thermiques associée aux axes du repère cartésien de référence. Cependant, en présence de courbures géométriques, le flux de chaleur se répartit suivant les multiples axes de projection. Ce cas concerne en particulier les coins du bobinage, pour lesquels l'hélicité faible sera ici négligée.



Figure–II–3– Détermination du tenseur de conductivité thermique.

La conductivité longitudinale suivant l'axe z reste invariante et par conséquent la loi de Fourier s'exprime par équivalence au travers du tenseur de conductivités thermiques λ suivant :

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{xx} & \lambda_{xy} & 0 \\ \lambda_{yx} & \lambda_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z \end{bmatrix} \quad (\text{II.83})$$

On cherche alors à exprimer en tout point de l'arrondi les quatre paramètres tensoriels partiels de caractérisant l'échange selon le plan d'appui (x,y).

Pour cela considérons un matériau possédant deux conductivités λ_u, λ_v connues et associées à un repère local (u,v). Le passage de ce repère au repère de référence (x,y), s'effectue au moyen de la matrice de rotation R née des diverses projections et vice et versa par sa matrice inverse notée R⁻¹:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (\text{II.84})$$

Avec :

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, R^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}.$$

Il est ainsi possible d'exprimer les flux de chaleur ϕ_x, ϕ_y du repère de référence, à partir de ceux associés au repère local (u,v) et donc de leurs gradients de températures respectifs

$$\begin{bmatrix} \phi_x \\ \phi_y \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} \phi_u \\ \phi_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_u & 0 \\ 0 & -\lambda_v \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial T}{\partial u} \\ \frac{\partial T}{\partial v} \end{bmatrix} \quad (\text{II.85})$$

Sachant que ces gradients s'expriment également comme suit :

$$\frac{\partial T}{\partial u} = \frac{\partial x}{\partial u} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial T}{\partial y}$$

$$\frac{\partial T}{\partial v} = \frac{\partial x}{\partial v} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial v} \frac{\partial T}{\partial y}$$

L'intervention de la matrice R-1, permet l'obtention de l'expression liant les flux de référence aux gradients de températures rapportés dans le repère (x,y) :

$$\begin{bmatrix} \phi_x \\ \phi_y \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} -\lambda_u & 0 \\ 0 & -\lambda_v \end{bmatrix} \cdot R^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (\text{II.86})$$

Finalement, en développant, sur la base des simplifications trigonométriques, l'expression des éléments recherchés du tenseur partiel de conductivités est :

Ces conductivités ne traduisent aucune réalité physique, mais uniquement une équivalence énergétique dans l'échange thermique par conduction et plus particulièrement pour le cas $\lambda_v > \lambda_u$. On vérifie bien de plus la permutation entre λ_u et λ_v pour $\theta = k\pi/2$ avec $k \in \mathbb{N}$, permettant d'assurer la continuité du flux dans chacune des extrémités de la spire. Si le matériau est homogène ($\lambda_u = \lambda_v$), seuls les termes diagonaux du tenseur subsistent et justifient alors son remplacement par un terme scalaire.

Les conductivités λ_u et λ_z se substituent, pour des couches d'enroulements homogénéisées, tandis que λ_v est choisi comme étant la conductivité thermique du matériau conducteur (cuivre). Les conductivités utilisées pour la modélisation thermique du transformateur sont définies pour chaque matériau par la table suivante :

Cuivre	Email	Tôles	Oxyde	Nomex	Support
375	0.85	79.4	0.8	0.13	0.18

Table-II-1- Conductivités thermiques par matériaux [W·m-1·K-1]

II-4-1-3- Coefficients d'échanges convectifs et radiatifs :

Les coefficients d'échange utilisés pour les surfaces horizontales sont ceux définis précédemment. Pour les parois verticales du noyau, le coefficient moyen utilisé s'exprime de manière similaire par :

$$h_{cv} = \frac{\lambda \cdot 0.59 \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^2}{L} \quad (\text{II.87})$$

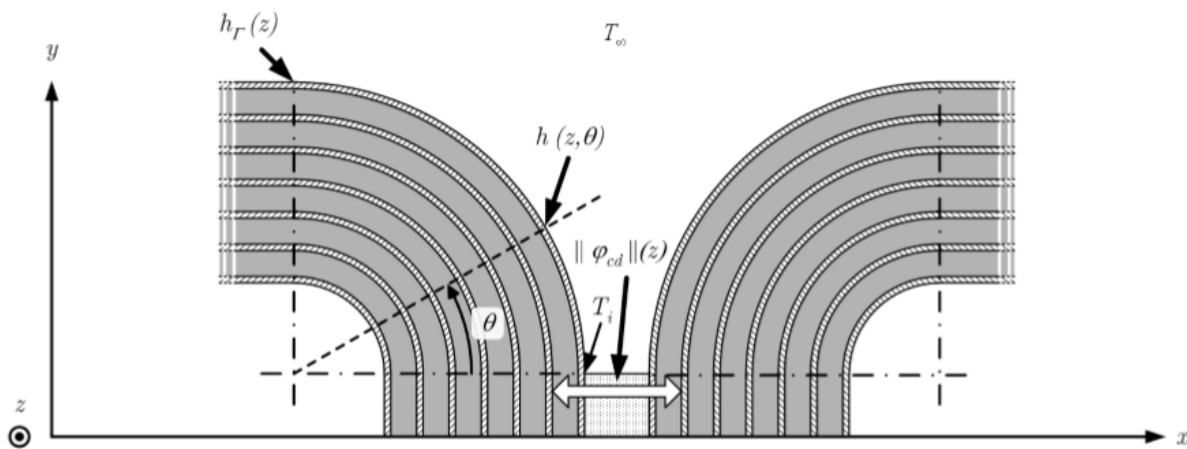
Le domaine de validité de ce coefficient est alors : $10^4 < \text{Ra} < 10^9$

Pour les parois verticales, un coefficient local basé sur une hypothèse de surface de bobinage isotherme a été préféré au coefficient.

$$h_{cv} = \frac{0.508 \lambda \cdot 0.59 \cdot \left(\frac{\text{Ra} \cdot \text{Pa}}{0.952 + \text{Pr}} \right)^2}{Z} \quad (\text{II.88})$$

Les meilleures performances obtenues se justifient alors par un gradient de température moindre sur le transformateur de dimensions plus réduites modélisé.

Un canal mince peut être remplacé par un coefficient d'échange convectif équivalent basé sur le nombre de Nusselt. La validité de cette notion de "couche mince" est cependant difficile à évaluer en fonction des dimensions de ce canal. Cette approche est donc difficilement envisageable pour la modélisation de l'échange entre deux coins.



Figure–II–4– Adaptation des coefficients de convection dans les espaces restreints.

II-4-2- Domaine thermique :

Les phénomènes thermiques dans les transformateurs et selfs doivent être pris en compte dès la conception de composants. En effet, les physiques thermiques et électriques sont fortement liées. La résistivité dépendant de la température, les caractéristiques du composant évoluent avec la température. De même, la température de fonctionnement doit être conforme avec la classe thermique du composant Tableau (II–2). L'utilisation d'un isolant en dehors de sa classe entraîne une usure rapide de ce dernier et peut être la cause d'un incendie.

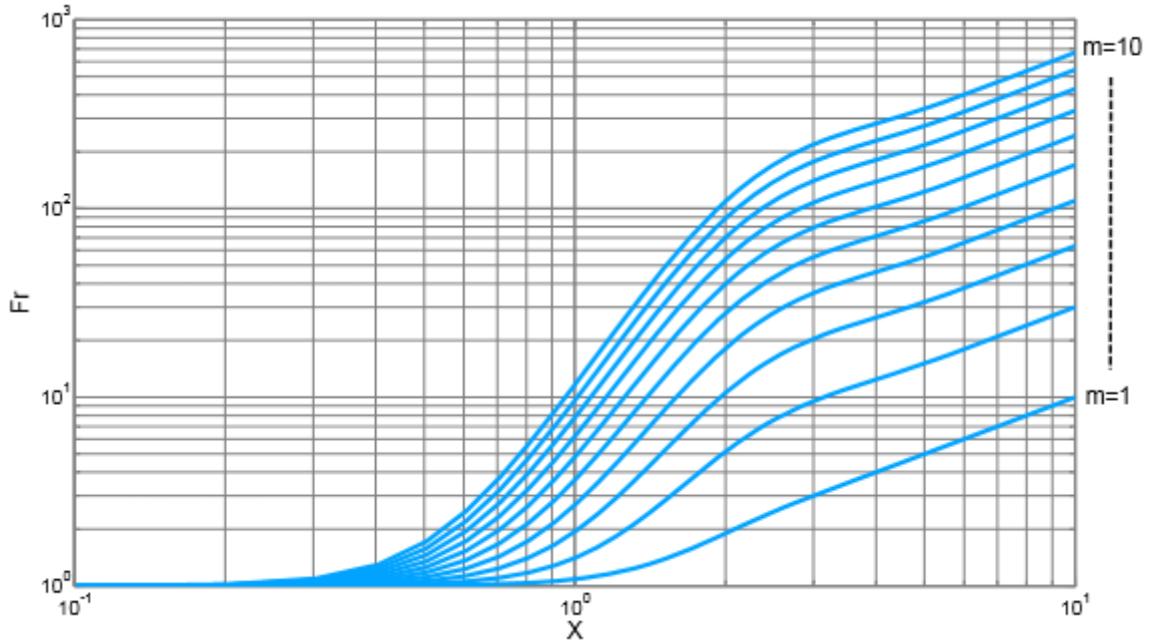


Figure-II-5– Facteur de pertes F_r dépendant de la fréquence et d’un nombre de couches (M).[9]

Classe thermique	Echauffement admissible	Echauffement maximum
H	125°C	180°C
F	105°C	155°C
B	80°C	130°C

Tableau-II-2– Classes thermiques.

Dans le domaine ferroviaire, la durée de vie des composants magnétiques est de l’ordre de 20-30 ans soit environ 200000 heures de fonctionnement. Or la durée de vie est principalement liée à celles des isolants. Le circuit magnétique et les matériaux conducteurs ne vieillissent pas. La décroissance de la durée de vie des isolants est liée à leur température d’utilisation. Par exemple, la durée de vie du Nomex 411 est très sensible à la température. Une augmentation de 10°K se caractérise par une réduction de la durée de vie par deux. La figure (II-6) obtenue par une méthode de vieillissement.

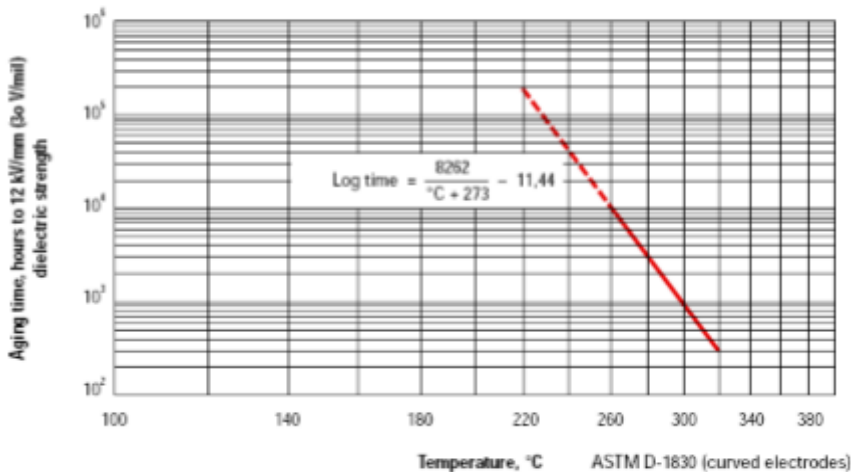


Figure-II-6-Durée de vie du Nomex411 en fonction de la température d’utilisation. [9]

Ainsi, afin de garantir le bon fonctionnement du composant, il est important de savoir localiser et estimer la température des points chauds. Ce sont ces “hot spots” qui vont définir la durée de vie du composant une erreur de plus de 10°K peut s’avérer dramatique. La tendance actuelle dans le monde ferroviaire est de dimensionner au plus juste les composants en limitant fortement le coefficient de sécurité. Le modèle thermique doit donc être capable de fournir des résultats permettant de garantir cette plage de sécurité. En cas d’erreur, il est très coûteux pour l’exploitant de devoir en cours de vie, stopper les trains et d’effectuer une maintenance sur les composants défectueux.

Les composants de l’étude font partie du convertisseur auxiliaire. Ils sont refroidis par une ventilation placée dans le coffre, afin de bien évacuer les pertes, il est souvent nécessaire de placer des canaux de ventilations dans le bobinage. Les trois phénomènes physiques classiques : conduction, convection et rayonnement seront présentés bien que ce dernier soit négligé de par le fort aspect convectif des composants. Il est à noter que les échauffements sont écrits en Kelvin et les températures absolues en Celsius. [9]

II-4-2-1- La précision de la modélisation :

La modélisation thermique des composants refroidis par air forcé est relativement difficile à concevoir. En effet, plusieurs éléments viennent croître drastiquement la difficulté d’obtenir des simulations justes et précises. Il apparaît qu’une précision inférieure à 10°K sur le point chaud est nécessaire. Or deux grandes catégories de problèmes interviennent : les incertitudes sur les données d’entrées et de sorties, mais également sur la complexité des modèles. [10]

II-4-2-1-1- Les incertitudes :

De nombreuses incertitudes apparaissent lors de la modélisation et de la validation. Celles-ci peuvent provenir d’un manque de connaissances, ou de causes liées aux dispersions de fabrication des composants. Dans le premier cas, la connaissance de la constitution du composant ne suffit pas. Les caractéristiques de chaque élément sont importantes. Or dans le cas des isolants électriques, l’évaluation précise des conductivités thermiques est difficile. Cette difficulté découle d’une part d’un manque d’information des fabricants et d’autre part de l’imprégnation des isolants avec une résine. L’impact de la résine sur la conductivité thermique est difficile à estimer. Elle sera souvent négligée

Les dispersions de fabrication posent également problème. Comment garantir des estimations thermiques inférieures à 10°K quand on peut observer des dispersions de cet ordre sur une série de composants supposés identiques ? De même, les composants triphasés sont symétriques de par leur géométrie. Les résultats thermiques devraient être également symétriques, pourtant il est courant d’avoir des disparités importantes entre colonne gauche et droite. La figure (II-7) montre un exemple d’asymétrie que l’on peut par exemple rencontrer sur un prototype. La différence est importante, elle peut s’expliquer par deux causes principales. La première est une ventilation non symétrique, la deuxième est une colonne dont le bobinage présente plus de foisonnement que les autres. Ainsi la précision absolue n’est pas possible à

atteindre ou n'a finalement pas de sens sauf à introduire des probabilités sur les simulations, ou chaque paramètre serait défini par une loi normale.

L'imprécision de mesure, causée par les thermocouples peut être supprimée par l'utilisation de fibres optiques comme outil de mesure. L'emploi de cette méthode est courante pour les mesures de température de gros transformateurs à huile de plus d'un MVA. Dans le cas des composants ferroviaires, le coût de ce type de mesures est prohibitif.

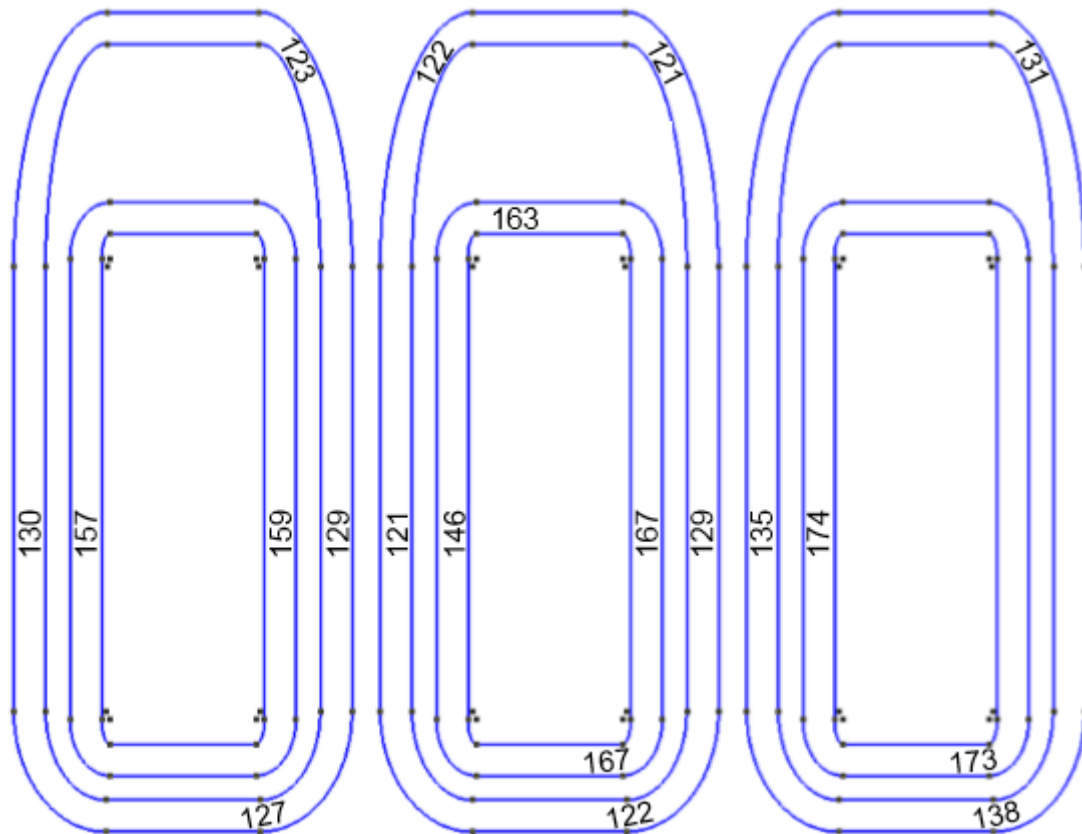


Figure-II-7- Températures mesurées en (°C) sur un transformateur à self intégrée. [9]

II-4-2-1-2- La complexité du bobinage :

Deux éléments importants apportent de la complexité. La première est l'isolation des bobines. En effet, afin de garantir la tenue diélectrique nécessaire, parfois en condition humide, il est indispensable de placer des isolants sur les conducteurs, entre les couches, en début et fin des bobinages par exemple. La figure(II-8) montre la topologie de l'isolation d'un transformateur à self intégrée. La diversité et la quantité d'isolants utilisés doivent être parfaitement simulées afin de garantir des simulations précises. Le second élément perturbateur est l'estimation des vitesses d'air dans les différents canaux. En effet, la géométrie des composants rend difficile l'estimation des vitesses d'air. De même, la présence de l'écran de ventilation est un élément clef à prendre en compte dans la modélisation.

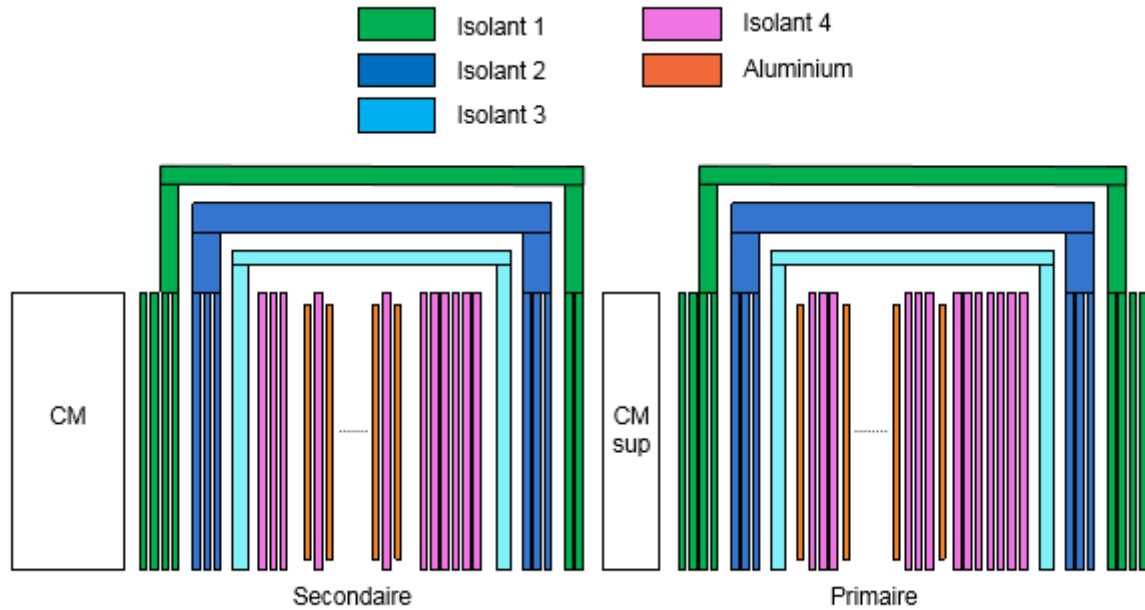


Figure-II-8- Complexité du système d'isolation. [9]

II-4-2-2- Les hypothèses :

Seul le régime permanent est calculé en thermique. En effet, il est considéré que les composants magnétiques atteignent leur température de régime permanent équivalant à la pleine charge. De cette hypothèse, les températures dans le régime transitoire ne sont pas calculées, car seul le régime permanent est dimensionnant sur la durée de vie du composant. Cela se traduit mathématiquement par $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$.

II-4-3-Généralité sur le Transfert de Chaleur :

Le transfert thermique est l'un des modes les plus communs d'échange d'énergie. Il intervient naturellement entre deux systèmes dès qu'existe entre eux une différence de température et cela quel que soit le milieu, même vide, qui les sépare. De ce fait, les transferts thermiques ont, aussi bien dans le domaine des sciences pures que dans celui des applications technologiques, un rôle souvent essentiel. Ce rôle devient même déterminant lorsqu'il est à l'origine des techniques utilisées (échangeurs, moteurs thermiques, calorifugeage, utilisation de l'énergie solaire, ...).

II-4-3-1- Environnement thermique :

L'environnement dans lequel est positionné l'élément impact la thermique de Celui-ci. Il existe 5 principales sources de perturbation thermique de l'élément :

1- La température :

La température du milieu ambiant est une contrainte importante imposant la température initiale de l'élément (avant son utilisation) et sa température de stockage. Lors de l'utilisation, la température du milieu ambiant peut changer en raison du transfert d'énergie avec les éléments proches par convection.

2- Les constantes de temps :

La durée des cycles d'utilisation de l'élément et de ceux environnants, ainsi que leurs durées d'utilisation sont des données importantes, jouant sur les augmentations et diminutions de température du composant.

3- L'humidité :

L'humidité favorise la corrosion, entraînant des modifications de résistances d'isolement des matériaux composant l'élément et donc la capacité de dissipation thermique. La teneur en eau fait également varier les échanges thermiques au niveau des conductivités thermiques.

4- Le rayonnement solaire :

Les éléments exposés au rayonnement solaire peuvent subir des échauffements provoquant une montée en température de l'élément.

5- La pression atmosphérique :

La pression intervient dans la ventilation servant à évacuer la puissance à dissiper, et permettant le renouvellement de l'air.

II-4-3-2- Expression des flux d'énergie :

Il faut ensuite établir les expressions des différents flux d'énergie. En reportant ces expressions dans le bilan d'énergie, on obtient l'équation différentielle dont la résolution permet de connaître l'évolution de la température en chaque point du système.

Le transfert de chaleur peut avoir lieu selon trois type :

- par conduction.
- par convection.
- par rayonnement.

Dans de nombreux problèmes de transformation d'énergie thermique, les trois modes de transfert de chaleur coexisteront mais, généralement, au moins une des trois formes pourra être négligée, ce qui simplifiera le traitement mathématique de l'opération de transfert. Nous pouvons dire dès à présent, qu'aux températures ordinaires, le transport par rayonnement est négligeable, mais il peut devenir notable et prépondérant lorsque le niveau de température augmente. En outre, signalons que certains transferts thermiques sont accompagnés d'un transfert de matière entre deux phases. Le flux de chaleur transféré en présence d'un changement de phase dépend de la nature et des propriétés physico-chimiques des phases en présence. C'est le cas de l'ébullition, de la condensation, mais aussi des problèmes d'humidification, de séchage, de cristallisation, etc.

II-4-3-2-1- Transfert de chaleur par conduction :

Le transfert de chaleur se fera par conduction dans le matériau c.à.d. à l'intérieur du matériau et sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier (Jean Baptiste Joseph Fourier en 1822) : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température.

$$\varphi = - \lambda \cdot \text{grad} (T) \quad (\text{II.89})$$

Ou sous forme algébrique : $\varphi = - \lambda \cdot S \cdot \frac{\partial T}{\partial x}$ (II.90)

Avec : φ flux de chaleur transmis par conduction (W)

λ : conductivité thermique du milieu W/(m.°C)

x : variable d'espace dans la direction du flux (m)

S : aire de la section de passage du flux de chaleur (m²)

$$\varphi = - \lambda \cdot S \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{W})$$

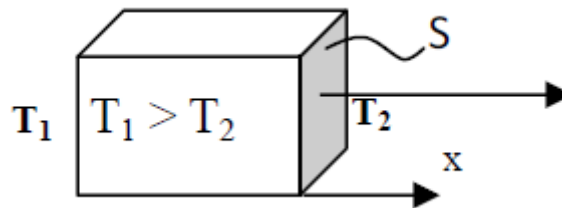


Figure II-9- Flux de chaleur dans parallélépipède.

II-4-3-2-2- Convection :

Le transfert de chaleur par convection est un phénomène de la mécanique des fluides. Il se fait par l'intermédiaire d'un fluide (un liquide ou un gaz) avec une surface d'un solide, et le principe de convection dans le cas particulier réside sur un principe physique (poussé d'Archimède), qui dit qu'un fluide chauffé va s'élever puisque sa masse volumique va diminuer, et le fluide frais descend car sa masse volumique va augmenter, alors le fluide chaud vers le haut et le fluide froid vers le bas qui crée un mouvement ce qu'on appelle un mouvement de convection.

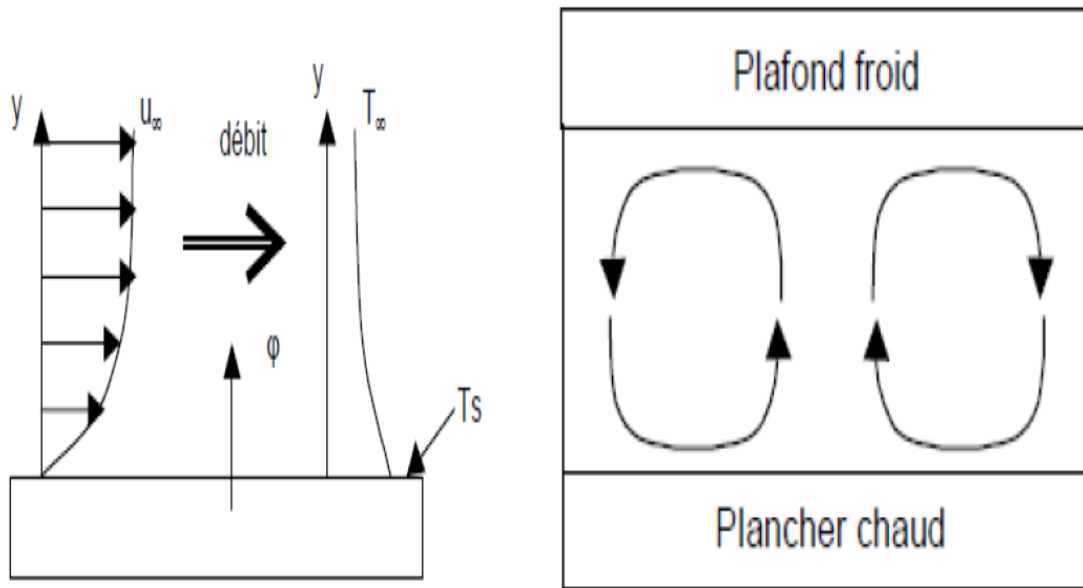


Figure II-10- Procédé de convection.

On classe généralement la convection en trois catégories : la convection naturelle, forcée et mixte.

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

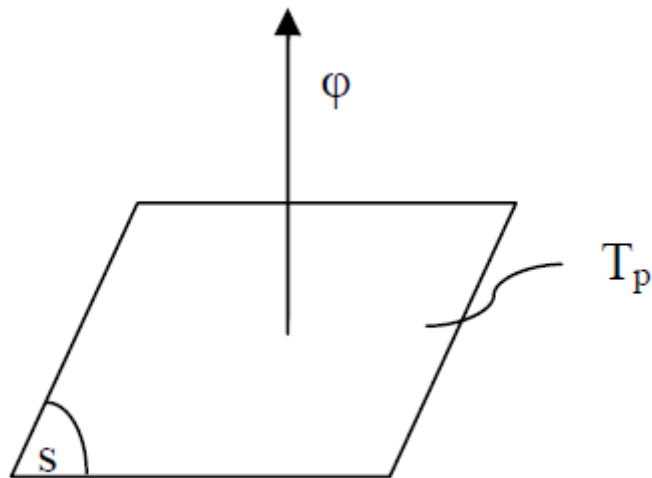


Figure II-11- Plaque chauffée.

Avec : $\Phi = h.S.(T_p - T_\infty)$ (II.91)

Φ : flux de chaleur (W).

H : coefficient de transfert de chaleur par convection ($W/m^2.\text{°C}$).

T_p : température de la paroi (°C).

T_∞ : température du fluide (°C).

S : section d'échange (m^2).

II-4-3-2-3- Rayonnement :

Le transfert de chaleur par rayonnement, ce type de transfert se fait à l'aide d'un rayonnement électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide), donc fera appel à des notions d'ondes électromagnétiques.

Les transferts par rayonnement se poursuivent même lorsque l'équilibre thermique est atteint, mais le débit net de chaleur échangé est nul. Ce type de transport de chaleur est analogue à la propagation de la lumière, et il ne nécessite aucun support matériel, contrairement aux écoulements. Les gaz, les liquides et les solides sont capables d'émettre et d'absorber les rayonnements thermiques.

Un point matériel chauffé émet un rayonnement électromagnétique dans toutes les directions situées d'un même côté du plan tangent au point matériel (voir figure II-12). Lorsque ce rayonnement frappe un corps quelconque, une partie peut être réfléchie, une autre transmise à travers le corps (dit diathermique si tout est transmis), et le reste est quantitativement absorbé sous forme de chaleur. Si on place dans une enceinte deux corps capables d'émettre un rayonnement thermique, il existe entre ces deux corps à températures différentes un échange de chaleur dû à l'absorption et à l'émission de ces rayonnements thermiques. Les transferts par rayonnement se poursuivent même lorsque l'équilibre thermique est atteint, mais le débit net de chaleur échangé est nul.

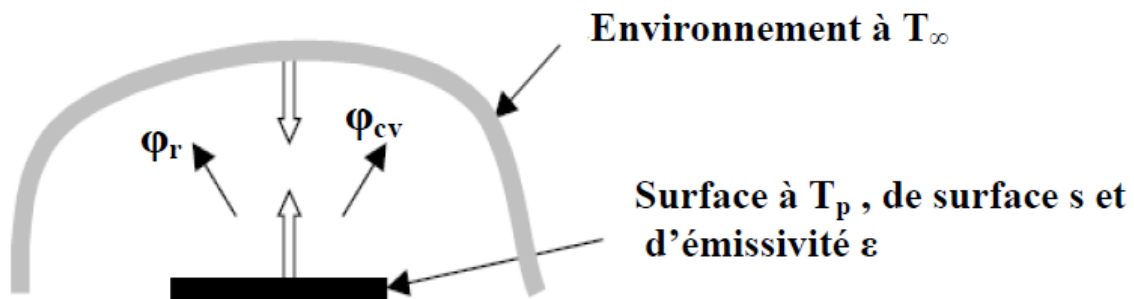


Figure II-12- Echange thermique par rayonnement sur une plaque.

$$\Phi_r = \sigma \cdot s \cdot \epsilon_p (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (\text{II.92})$$

Avec :

Φ_r : flux de chaleur transmis par rayonnement (W).

Σ : constante de Stefan ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$).

ϵ_p : facteur d'émission de la surface.

T_p : température de la surface (K).

T_∞ : température du milieu environnant la surface (K).

S : aire de la surface (m^2).

II-5- Couplage Electromagnétique et Thermique :

La résistivité ρ d'un matériau conducteur (cuivre ou aluminium) intervient dans le calcul des résistances et varie linéairement pour des températures faibles à modérées :

$$\rho(T) = \frac{1}{\sigma(T)} = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T) \quad (\text{II.93})$$

ρ_0 : Est la résistivité du matériau à 0°C et α est le coefficient de température du matériau soit $3.93 \cdot 10^{-3}$ pour le cuivre et $4.03 \cdot 10^{-3}$ pour l'aluminium.

La source d'échauffement dans l'équation de la chaleur provient des pertes dans le transformateur et fait aussi intervenir cette résistivité :

$$P = \rho(T) \cdot \|J\|^2 + P_f + P_{vagabonde} \quad (\text{II.94})$$

Les deux équations électromagnétique et thermique sont donc fortement couplées. Une méthode itérative est donc nécessaire pour le calcul de la distribution de température.

II-6- Les pertes :

Il existe différents types de pertes dans le transformateur, tels que pertes en fer, pertes en cuivre, pertes par hystérésis, pertes par courants de Foucault, pertes parasites, et pertes diélectriques les pertes par hystérésis sont dues à la variation de la magnétisation dans le noyau de transformateur et les pertes en cuivre sont dues à la résistance de l'enroulement du transformateur. [11]

II-6-1- Pertes Joule :

C'est la dissipation d'énergie sous forme de chaleur, provoquée par le passage du courant électrique dans les enroulements primaire et secondaire et les parties de connexion. Elles sont facilement calculables, si on connaît la résistance des enroulements (Généralement en cuivre).

Les pertes joules volumiques dans le cuivre, qui s'exprime par :

$$P_v = \rho_c \cdot \left(\frac{I}{S_c}\right)^2 \quad (\text{II.95})$$

Avec :

P_v : les pertes volumiques.

ρ_c : La résistivité de cuivre.

I : le courant moyen traversant une phase du convertisseur.

S_c : la section des conducteurs.

II-6-2- Les pertes fer :

Les pertes en fer sont causées par le flux alternatif dans le noyau de transformateur, cette perte se produisent dans le noyau est également appelé pertes du noyau.

Les pertes en fer en suite divisée en pertes par hystérésis, et pertes par courants de Foucault.

II-6-2-1- Pertes par hystérésis :

Le noyau de transformateur est soumis à une force magnétisante alterné, et pour chaque cycle de force électromotrice, une boucle hystérésis est tracé. La puissance est dissipée sous forme de chaleur appelé pertes par hystérésis et donné par l'équation ci-dessous : [11]

$$P_h = K\eta \cdot B_{max}^{1.6} \cdot f \cdot V \quad (II.96)$$

$K\eta$: Constante de proportionnalité qui dépend de volume et de qualité de matériau du noyau utilisé dans le transformateur.

f : la fréquence d'alimentation.

B_{max} : la valeur maximale ou maximale de la densité de flux.

Les pertes fer ou de noyau peuvent être minimisées en utilisant un acier au silicium pour la construction de noyau du transformateur.

II-6-2-2- Pertes par courant de Foucault :

Lorsque le flux est lié à un circuit fermé un f.é.m. est induite dans le circuit et que le courant circule, la valeur du courant dépend de la qualité de force électromotrice autour du circuit et de la résistance de circuit. Le noyau étant constitué d'un matériau conducteur, ces champs électromagnétiques font circuler des courants dans le corps de matériau. Ces courants circulent sont appelés courants de Foucault. Ils se produiront lorsque le conducteur subira un champ magnétique changeant. Comme ses courants sont responsables aucun travail utile, et que cela produit une perte dans le matériau magnétique connu sous nom Pertes par courant de Foucault.

La perte par courant de Foucault est minimisée en réalisant le noyau avec des laminations mince. L'équation de la perte par courants de Foucault est donnée par : [11]

$$P_e = K_e B_m^2 t^2 f^2 v \quad (II.97)$$

Où :

K_e : coefficient de courants de Foucault, sa valeur dépend de la valeur de matériau magnétique comme le volume et la résistivité de matériau de noyau, de l'épaisseur des tôles.

B_m : la valeur maximale de flux en (wb/m^2).

t : l'épaisseur de laminage en mètres (m).

f : fréquence d'inversion du champ magnétique en (Hz).

v : volume de matériau magnétique en (m^3).

II-6-3-Pertes de cuivre ou pertes ohmiques :

Ces pertes sont due à la résistance ohmique des enroulements du transformateur. si I_1 et I_2 sont les courants primaires et secondaire. R_1 et R_2 sont la résistance des enroulements

primaire et secondaire, les pertes de cuivre survenant dans les enroulements primaire et secondaire seront $R_1 I_1^2$ et $R_2 I_2^2$ respectivement.

Par conséquent, les pertes totales de cuivre seront :

$$P_c = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 \quad (\text{II.98})$$

Ces pertes ont varié en fonction de la charge et sont connues sous le nom de pertes variables.

Les pertes de cuivre varient en fonction du carré du courant de charge.

II-6-4- Perte supplémentaires :

La survenue de ces pertes parasites est due à la présence d'un champ de fuite. Le pourcentage de ces pertes est très faible comparé aux pertes en fer et en cuivre, elles peuvent donc être négligées.

II-6-5- Perte diélectrique :

La perte diélectrique se produit dans le matériau isolant du transformateur qui se trouve dans l'huile du transformateur ou dans les isolations pleines. Lorsque l'huile est détériorée ou que l'isolant solide est endommagé ou que sa qualité diminue, l'efficacité du transformateur est affectée.

II-7- Méthodes de résolution :

Dans les procédés possédant des géométries simples, la résolution des équations électromagnétique et thermique peut être effectuée analytiquement. Le modèle paramétrique réduit est alors caractérisé par des résistances et des capacités mais ne permet pas l'évaluation précise du point chaud pour une géométrie réelle de transformateur. On a alors recours à des méthodes numériques. La méthode des différences finies aurait pu être envisagée ici, mais reste très contraignante à adapter à la géométrie, et particulièrement en trois dimensions. Nous lui avons donc préféré la MEF nodaux, étant donné que les inconnues sont scalaires à la fois dans les équations électromagnétique et thermique. [8]

II-7-1- Résolution par la méthode des éléments finis (MEF) :

La résolution analytique des équations de Maxwell n'est possible que dans certaines configurations simples. Dans la majorité des cas, il convient de faire appel à des méthodes de résolutions numériques comme celle des éléments finis (MEF).

Née de la mécanique, la méthode des éléments finis est aujourd'hui couramment employée pour la résolution des problèmes caractérisés par des équations aux dérivées partielles, comme celle des ondes électromagnétiques qui nous intéresse plus particulièrement.

Le principe bien connu de la méthode est de discrétiser le domaine d'étude en de multiples éléments puis de résoudre localement, dans chacun de ceux-ci, les équations associées à la formulation retenue. Les inconnues élémentaires sont alors définies par une combinaison linéaire, pondérée par des polynômes d'interpolation. La précision du calcul est liée à la finesse du maillage et au degré de ces polynômes. Leurs coefficients ne dépendent que de la géométrie et de sa discrétisation. Finalement, on obtient après assemblage un système matriciel d'équations, pouvant tenir compte de certaines non linéarités, comme celle intervenant dans le noyau ferromagnétique.

II-7-2- Algorithme de calcul :

A partir de la décomposition fréquentielle du courant I consommé par une charge non linéaire, un premier modèle électromagnétique vise à déterminer, pour chaque fréquence, la distribution des densités de courant dans les conducteurs.

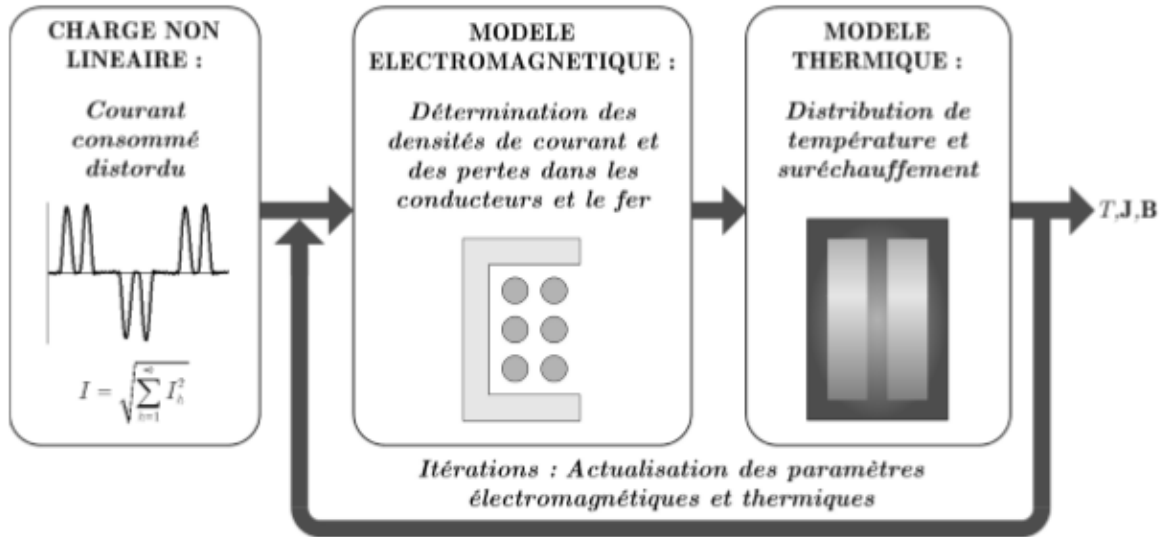


Figure II-13- Schéma synoptique de la problématique d'étude.

Le balayage du spectre permet alors le calcul des pertes totales à injecter dans le modèle thermique, pour évaluer la distribution de température au sein des enroulements. Les paramètres physiques tels que la résistivité ρ du matériau conducteur, mais également les différents coefficients d'échange thermique sont alors actualisés, avant de réitérer l'emploi du modèle électromagnétique puis thermique jusqu'à convergence vers un état d'équilibre.

Mis à part le calcul de la température dans les enroulements, le système complet permet également d'obtenir la variation fréquentielle et thermique de leur impédance interne, ainsi que la distribution des flux fuites ou du champ magnétique dans le noyau.

La résolution du problème d'étude nécessite donc deux boucles itératives distinctes. Une première interne et indexée sur les rangs harmoniques s'applique au modèle électromagnétique. Une seconde externe et moins contraignante assure le couplage avec les équations thermiques. La mise en œuvre de cette double itération est présentée dans l'organigramme détaillé qui suit.

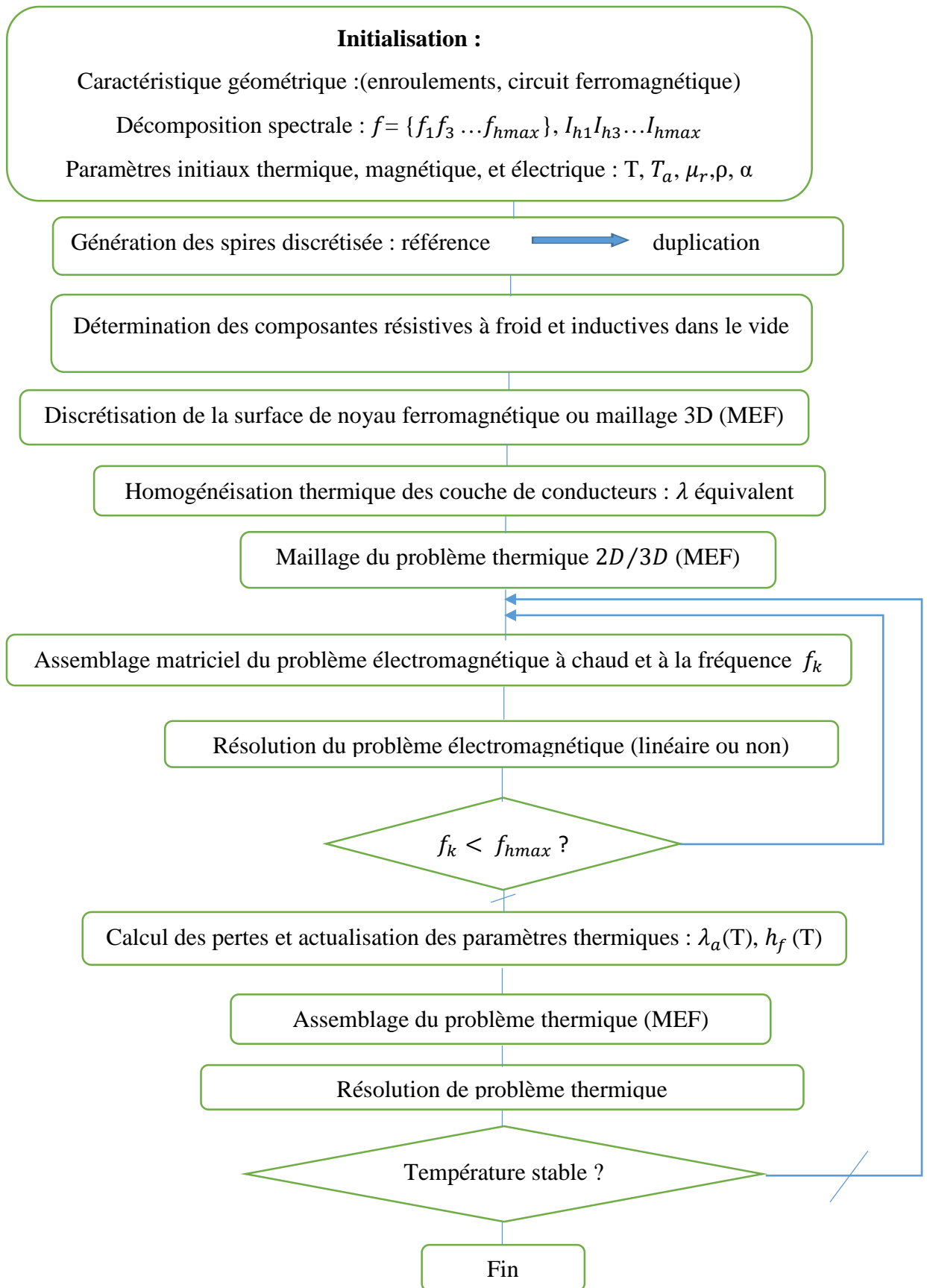


Figure II-14- Algorithme de résolution magnétothermique.

II-7-3- Discrétisation du domaine d'étude :

Cette étape consiste à mailler le domaine d'étude en un nombre fini d'éléments appelés sous domaines. Ce maillage doit satisfaire aux conditions suivantes : [10]

La somme de tous les éléments doit former le domaine d'étude.

Les éléments assemblés ne peuvent avoir en commun que des sommets (nœuds) ou des segments situés dans leurs frontières.

Les éléments assemblés ne peuvent avoir en commun que des sommets (nœuds) ou des segments situés dans leurs frontières.

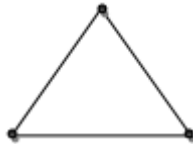
Les éléments finis classiques employés dans la plupart des cas pour discrétiser un domaine d'étude quelconque, représentés sur la figure, sont les suivants :

A une dimension : un élément droit.



Elément droit

A deux dimensions : un triangle.



Elément triangulaire

A trois dimensions : un tétraèdre.



Elément tétraédrique

II-7-4- Discrétisation des équations aux dérivées partielles (EDP) :

Résoudre par éléments finis les équations aux dérivées partielles qui décrivent les modèles, magnétostatique ou magnétodynamique et thermique, présentés au chapitre précédent, revient à appliquer la méthode projective de GALERKINE :

$$\iint_{\Omega} \alpha_i \cdot \text{EDP} \, dV = 0 \quad (\text{II.99})$$

Par exemple pour le model magnétostatique représenté en coordonnées cartésiennes comme suit :

$$\iint_{\Omega} \alpha_i \left[-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) \right] dx dy = \iint_{\Omega} \alpha_i j_{sz} dx dy \quad (\text{II.100})$$

L'application du théorème de Green à l'équation permet à la fois d'évacuer les dérivées d'ordre deux de son premier terme et d'expliciter les conditions aux limites :

$$\begin{aligned} \iint_{\Omega} \alpha_i \left[-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) \right] dx dy &= \iint_{\Omega} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial \alpha_i}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial \alpha_i}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) \right] dx dy \\ &- \int_{\Gamma} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial n} d\Gamma \end{aligned} \quad (\text{II.101})$$

Dans le cas des conditions aux limites de type Dirichlet = 0 ou de type Neumann

$\frac{\partial A}{\partial x} = 0$ dite condition Neumann homogène), le terme sur la frontière s'annule. L'équation devient :

$$\iint_{\Omega} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial \alpha_i}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial \alpha_i}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) \right] dx dy = \iint_{\Omega} \alpha_i j_{sz} dx dy \quad (\text{II.102})$$

Sachant que le potentiel vecteur magnétique A_z peut-être discrétisé sous la forme

$A_z = \sum_{j=1}^N \alpha_j A_{zj}$ pour tous les nœuds du domaine d'étude. Cela nous amène à écrire l'équation comme suit :

$$\iint_{\Omega} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial \alpha_i}{\partial x} \left(\frac{\partial \alpha_j}{\partial x} \right) + \frac{\partial \alpha_i}{\partial y} \left(\frac{\partial \alpha_j}{\partial y} \right) \right] \alpha_i j_{sz} dx dy = \iint_{\Omega} \alpha_i j_{sz} dx dy \quad (\text{II.103})$$

i, j varient de 1 à N .

On obtient en finalité un système algébrique matriciel à résoudre :

$$[M][A] = [J] \quad (\text{II.104})$$

Où :

$$M_{ij} = \iint_{\Omega} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial \alpha_i}{\partial x} \left(\frac{\partial \alpha_j}{\partial x} \right) + \frac{\partial \alpha_i}{\partial y} \left(\frac{\partial \alpha_j}{\partial y} \right) \right]$$

$$J_i = \alpha_i j_{sz} dx dy$$

[A]: Inconnu du domaine d'étude.

Le seul changement qui interviendra dans ce cas est la prise en compte de la variation du potentiel vecteur magnétique par rapport au temps. En adoptant la même démarche que dans le cas du modèle magnétostatique, nous aboutissons à la formulation éléments finis des équations magnétodynamiques transitoires en coordonnées cartésiennes :

$$\iint_{\Omega} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial \alpha_i}{\partial x} \left(\frac{\partial \alpha_j}{\partial x} \right) + \frac{\partial \alpha_i}{\partial y} \left(\frac{\partial \alpha_j}{\partial y} \right) \right] A_z dx dy + jw \iint_{\Omega} \alpha_i \alpha_j \sigma A_z dx dy = \iint_{\Omega} \alpha_i j_{sz} dx dy \quad (\text{II.105})$$

i, j varient de 1 à N .

Le système algébrique à résoudre relatif à ce cas est :

$$[M][A] + jw[L][A] = [J]$$

Où :

$$M_{ij} = \iint_{\Omega} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial \alpha_i}{\partial x} \left(\frac{\partial \alpha_j}{\partial x} \right) + \frac{\partial \alpha_i}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \alpha_j}{\partial y} \right) \right]$$

$$J_i = \iint_{\Omega} \alpha_i j_{sz} dx dy$$

$$J_{ij} = \iint_{\Omega} \alpha_i \alpha_j \sigma A_z dx dy$$

Il est évident que pour le modèle thermique la démarche aboutirait au même système algébrique que dans les deux cas précédents.

II-8- Conclusion :

Pour l'étude d'un phénomène ou la conception d'un système électromagnétique (transformateur), l'évaluation des champs électrique et magnétique apparaît comme un travail nécessaire et incontournable.

Ce chapitre a fait l'objet d'une description générale des équations de Maxwell, la relation entre ces équations nous a permis de retrouver les modèles mathématiques en l'occurrence, le modèle magnétostatique et le modèle magnétodynamique en régime harmonique et transitoire simple à étudier.

Dans notre travail, on procédera à l'étude d'un transformateur par la méthode des éléments finis en bidimensionnelle (2D) en coordonnées cartésiennes.

A decorative graphic of a scroll with a green outline and grey circular accents at the corners. The text is centered within the scroll.

Chapitre III

*Simulation numérique de
transfert thermique dans
un transformateur triphasé*

III-1- Introduction :

Dans tous les transformateurs, une fraction de la puissance active reçue passe sous forme calorifique, dans le fer par hystérésis et courant de Foucault, dans le cuivre par effet Joule et dans les isolants par les pertes diélectriques.

Ce chapitre présente une application de modèle thermique, développé pour un transformateur de distribution, existant déjà à Electro-industrie d'AZAZGA (ex-ENEL) ainsi que l'exploitation des résultats.

Tout a d'abord, on a commencé par une présentation des grandeurs géométriques du transformateur étudié.

Par suite, on va effectuer une résolution de problème thermique (problème d'échauffement dans tous les régions de transformateur). Dans cette étude, en utilisant la méthode des éléments finis à deux dimensions, à l'aide de logiciel (F.E.M.M version 4.2), cette méthode est très utilisée et adaptée pour des géométries complexes ainsi que pour l'étude des différents phénomènes électromagnétiques.

On a fini ce chapitre, avec trois étapes fondamentales, le premier l'essais on va fixer le coefficient de la conductivité de glass fibre, est pris égale à $0.08 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, et le deuxième c'est l'essai lorsque le coefficient de conduction équivalent aux matériaux de l'enroulement est important. Finalement, dans la dernière étape on varie l'épaisseur de l'isolant dans le cas nominal.

III-2- Présentation du logiciel FEMM :

F.E.M.M (Finit Element Magnetics Method) est une suite de programmes pour la résolution des problèmes statiques ainsi que des problèmes de basses fréquences en électromagnétisme, et récemment en thermique. Ce logiciel d'accès libre s'applique à des problèmes 2D en coordonnées cartésiennes ou axisymétrique.

La résolution des problèmes électromagnétiques et thermiques par le logiciel F.E.M.M passe par trois étapes principales, à savoir, le préprocesseur, le solutionneur, et le poste processeur.

a- Préprocesseur (femme.exe) :

C'est un programme permettant de définir la structure à étudier et d'affecter les propriétés des matériaux à chaque région et les conditions aux limites choisies, ainsi que le type de problème à résoudre (plan, axisymétrique).

b- Résolveur (fkerne.exe) :

Le résolveur résout le système matriciel qui décrit le problème, en utilisant l'ensemble des fichiers de données qui décrivent le problème pour enfin trouver les valeurs du potentiel ou de la température dans le domaine considéré. Pour se faire, un programme additionnel est appelé à accomplir le maillage.

➤ **Triangle.exe :**

C'est un programme qui décompose le domaine d'étude en un grand nombre de triangles. Il constitue une étape essentielle du processus de la méthode des éléments finis.

c- Post processeur (femmview.exe) :

C'est une interface graphique qui permet de traiter les résultats fournis par le résolveur dans les différentes régions. Le programme permet aussi d'examiner la valeur du potentiel ou de la température en n'importe quel point du domaine d'étude.

➤ **Femplot.exe :**

C'est un programme employé pour tracer différentes courbes en fonction des grandeurs géométriques du système étudié.

III-3- Organigramme :

Le logiciel FEMM, que nous avons élaboré pour l'étude du transformateur peut être schématisé par l'organigramme ci-contre :

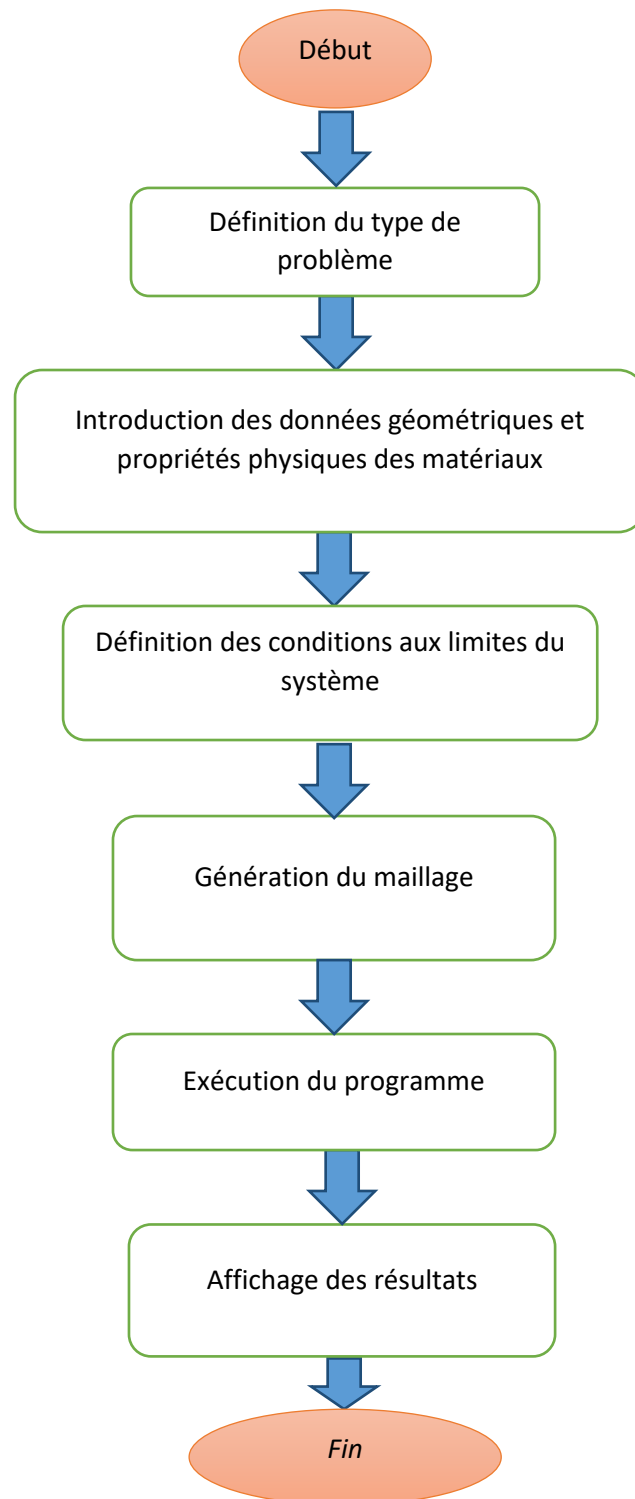


Figure-III-1- Organigramme de calcul utilisant la méthode des éléments finis.

III-4- Présentation du transformateur étudié :

III-4-1- Les caractéristiques géométriques :

La configuration géométrique du transformateur en coupe transversale est donnée par la figure III-2.

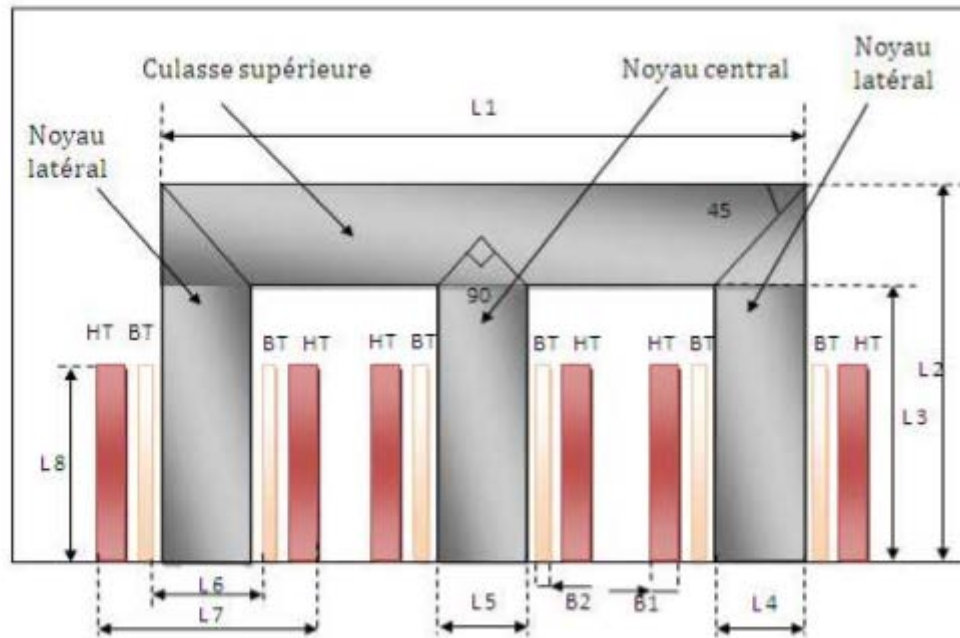


Figure-III-2- Configuration géométrique transversal 2D de la moitié du transformateur.

Les dimensions géométriques du transformateur sont données dans le tableau III-1- comme suit :

Composante	Signification	Valeur	Unité
L1	Longueur de la culasse	930	mm
L2	Hauteur extérieur du noyau latéral	810/2	mm
L3	Hauteur intérieur du noyau latéral	450/2	mm
L4	Largeur du noyau latéral droite	180	mm
L5	Largeur du noyau central	180	mm
L6	Diamètre intérieur de la bobine BT	198	mm
L7	Diamètre extérieur de la bobine HT	351	mm
L8	Hauteur des enroulements	436/2	mm
B1	Epaisseur de la bobine haute tension	43	mm
B2	Epaisseur de la bobine basse tension	20.5	mm

Tableau III-1- Données géométriques du transformateur.

III-4-2- Les propriétés électriques et magnétiques :

Les propriétés physiques relatives au modèle électromagnétique sont données par le tableau (III.2) suivant :

Régions du transformateur	Perméabilité Magnétique Relative	Conductivité Electrique $\times 10^6 [\Omega m]^{-1}$
Enroulements (cuivre)	1	58
Tôles magnétiques (FeSi)	$\mu_{xx} = 2000$ $\mu_{yy} = 2000$	2
Air environnant	1	0

Tableau-III-2- Propriétés électromagnétique.

Les données du transformateur sont présentées dans le tableau suivant :

Caractéristique	Valeurs	Unité
Puissance apparente	630	kVA
Nombre de phase	3	-
Fréquence d'alimentation	50	Hz
Connexion des enroulements primaires	Triangle (D)	-
Connexion des enroulements secondaires	Etoile (Y)	-
Tension nominale au primaire	30	kV
Tension nominale au secondaire	400	V
Courant nominal au primaire	12,12	A
Courant nominal au secondaire	909	A
Nombre de spires au primaire	3000	-
Nombre de spires au secondaire	22	-
Nombre de couches au primaire	14	-
Nombre de couches au secondaire	2	-
Résistance de l'enroulement primaire	17,33	Ω
Résistance de l'enroulement secondaire	2,71 1e-3	Ω
Inductance de l'enroulement primaire	1,4 1e-3	H
Inductance de l'enroulement secondaire	0,154	H

Tableau-III-3- Les données du transformateur.

III-5- Résolution du problème thermique :

III-5-1- Influence de la valeur basse de Le coefficient de la conductivité de matériau isolant (glass fibre) :

Le coefficient de la conductivité thermique de l'isolant fibre de verre (*glass fibre*), est pris égale à 0.08 W/(m*K).

III-5-1-1- Cas du point nominal :

- Dans les deux bobines (HT et BT), on prend les pertes joules et on néglige les pertes fer ($P_{fer} = 0$).

Calcule les pertes joules volumiques :

1- La bobine BT :

$$P_{v1} = \frac{R_{BT} I_{BT}^2}{V_{BT}}$$

On a $h = 1.1 \text{ m}$, $L = 0.436 \text{ m}$, $l = 0.0205 \text{ m}$, $I_{BT} = 909 \text{ A}$, $R_{BT} = 2.71 * 10^{-3} \Omega$

$$V_{BT} = 2 * (0.2185 + 1.1) * S_{BT}$$

Avec : $S_{BT} = 0.008938 \text{ m}^2$

$$V_{BT} = 0.023569 \text{ m}^3$$

$$P_{v1} = \frac{2.71 * 10^{-3} * 909^2}{0.023569}$$

$$P_{v1} = 95007.065 \text{ W/m}^3$$

1- La bobine HT :

$$P_{v2} = \frac{R_{HT} I_{HT}^2}{V_{HT}}$$

On a : $L = 0.436 \text{ m}$, $l = 0.043 \text{ m}$, $I_{HT} = 12.12 \text{ A}$, $R_{HT} = 17,33 \Omega$

$$V_{HT} = 2 * (0.38 + 1.1) * S_{HT}$$

Avec : $S_{HT} = 0.018748 \text{ m}^2$

$$V_{HT} = 0.052794 \text{ m}^3$$

$$P_{v2} = \frac{17.33 * 12.12^2}{0.052794}$$

$$P_{v2} = 48219.11 \text{ W/m}^3$$

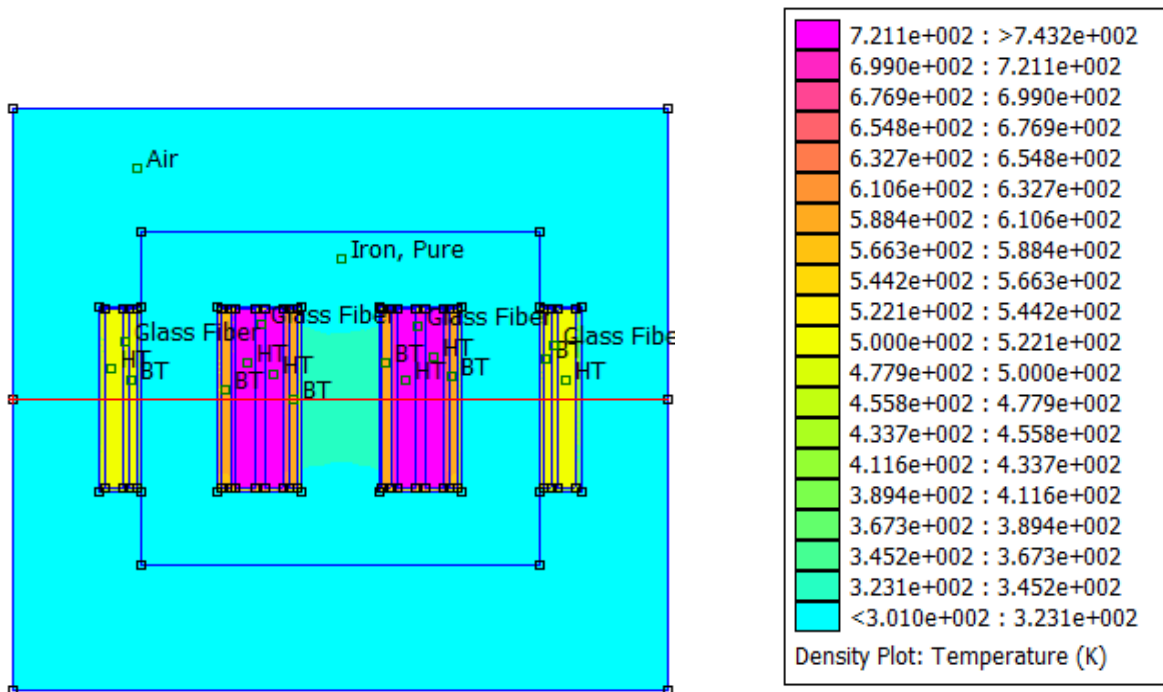


Figure-III-3- Répartition de température dans le transformateur.

➤ Si on prend en considération les pertes fer dans le transformateur :

Calcul des pertes fer pour une induction : $B = B_m = 2 \text{ T}$.

$$P_{fer} = P_{cf} + P_{hys}$$

$$P_{fer} = k_{hys} \cdot B^2 \cdot f + k_{cf} \cdot B^2 \cdot f^2$$

On a:

$$f = 50 \text{ (Hz)}, k_{hys} = 0.012 \frac{\text{W}}{\text{kg T}^2}, k_{cf} = 12.71 \cdot 10^{-5} \frac{\text{W}}{\text{kg T}^2}, m_v = 7874 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Les coefficients des pertes par hystérésis et courants de Foucault ont été tirés de la littérature spécialisée.

$$P_{hys} = k_{hys} \cdot B^2 \cdot f$$

$$P_{hys} = 0.012 * 50 * (2)^2$$

$$P_{hys} = 2.4 \text{ W}$$

$$P_{cf} = k_{cf} \cdot B^2 \cdot f^2$$

$$P_{cf} = 12.71 * 10^{-5} * (2)^2 * (50)^2$$

$$P_{cf} = 1.271 \text{ W}$$

$$P_{fer(volumique)} = (k_{hys} \cdot B^2 \cdot f + k_{cf} \cdot B^2 \cdot f^2) m_v$$

$$P_{fer(volumique)} = (2.4 + 1.271) * 7874$$

$$P_{fer(volumique)} = 28905.454 \text{ (W/m}^3\text{)}$$

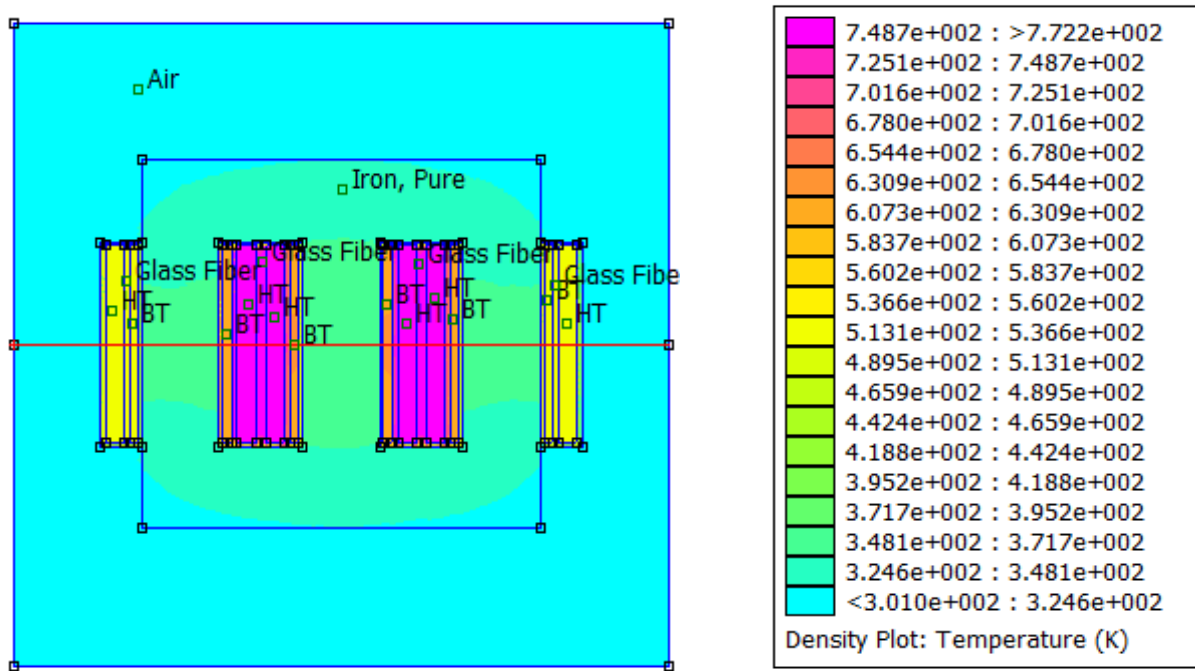


Figure-III-4- Répartition de température dans le transformateur.

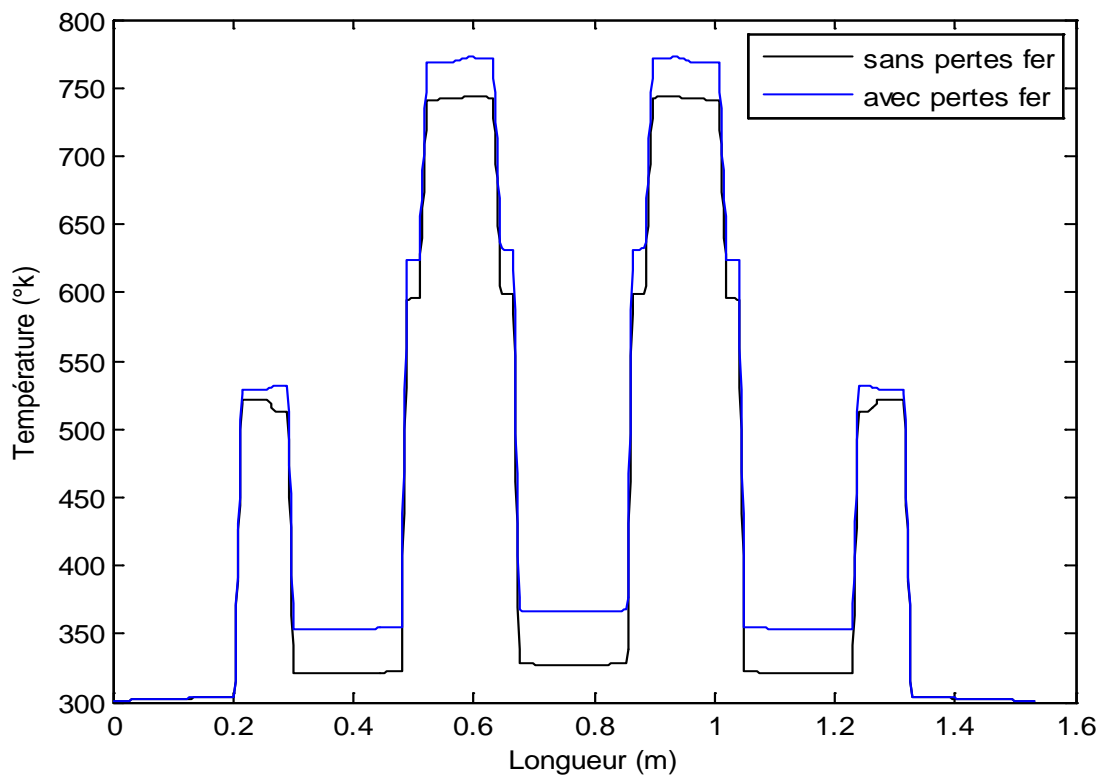


Figure-III-5- Courbes de la variation de température le long de la ligne rouge des figures (-III-3-) et (-III-4-).

III-5-1-2- Cas de demi charge :

- Dans les deux bobines (HT et BT), on prend les pertes Joule et on néglige les pertes fer ($P_{fer} = 0$).

Calcule les pertes Joule volumiques :

a- La bobine BT :

$$I_{BT} = (909/2) = 454.5 \text{ A} \longrightarrow P_{v1} = 23751.766 \text{ w/m}^3$$

b- La bobine HT :

$$I_{HT} = (12.12/2) = 6.06 \text{ A} \longrightarrow P_{v2} = 12054.778 \text{ w/m}^3$$

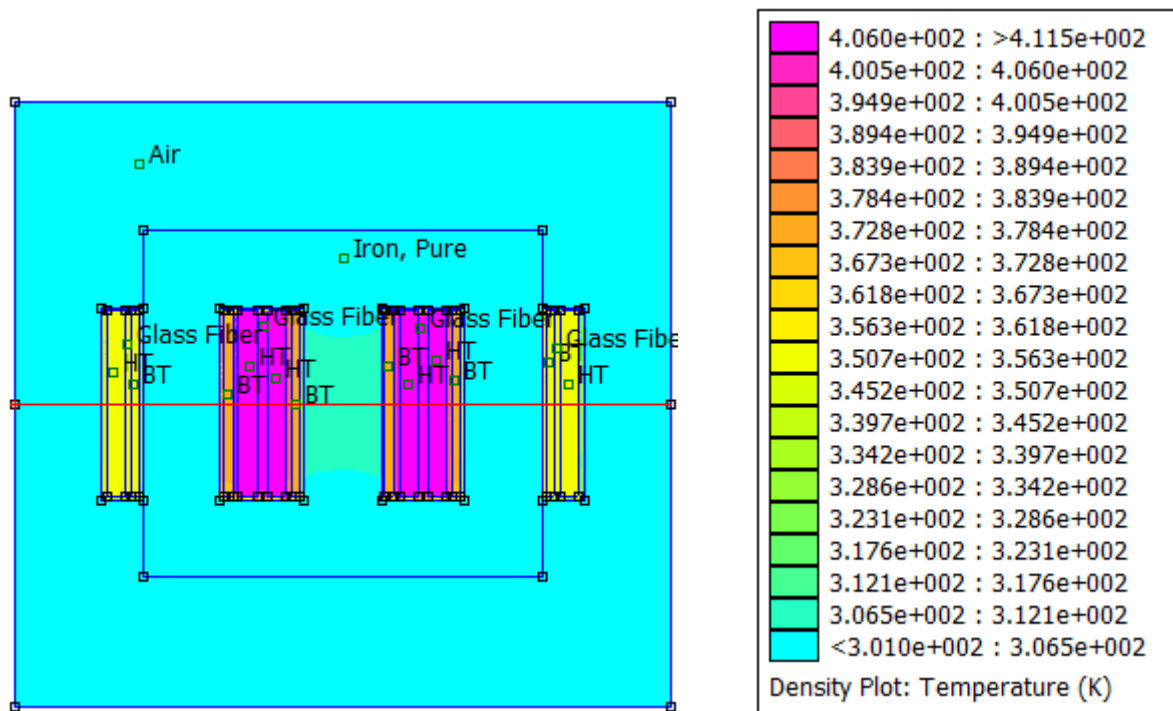


Figure-III-6- Répartition de température dans le transformateur.

➤ On prend considération les pertes fer dans le matériau

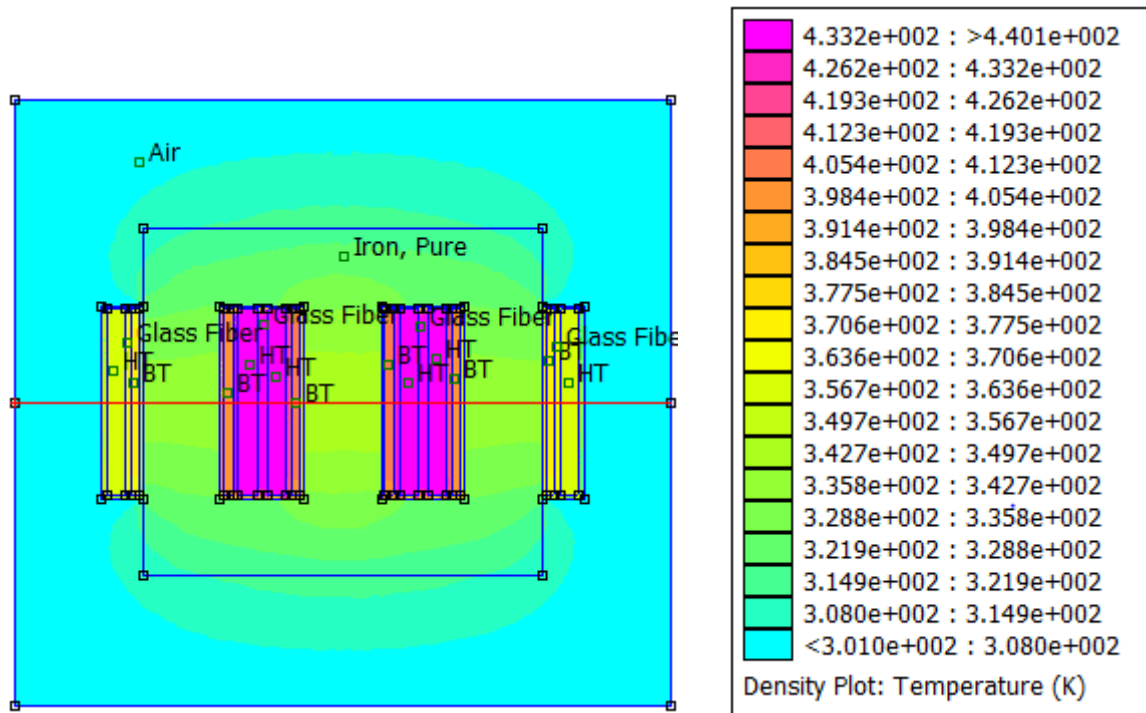


Figure-III-7- Répartition de température dans le transformateur.

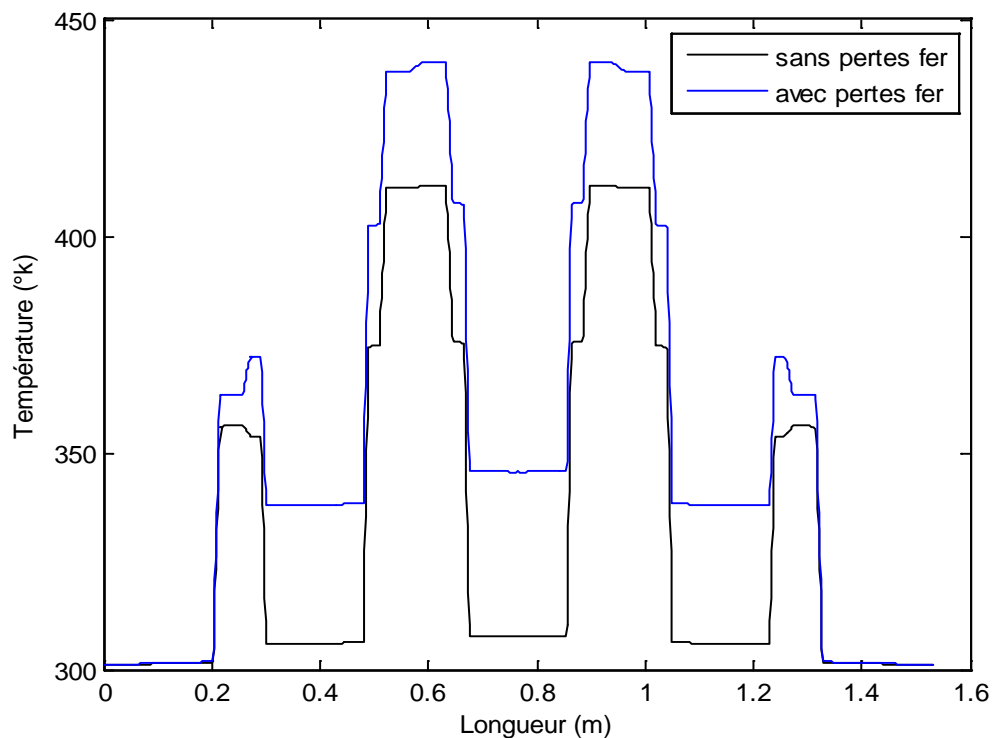


Figure-III-8- Courbes de la variation de température le long de la ligne rouge des figures (-III-6-) et (-III-7-).

III-5-1-3- Cas à vide :

$I_{10} = 10\%$. $I_{BT} = A$, donc $P_{v1} = 950.07 \text{ W /m}^3$

$I_{20} = 0 \text{ A}$, donc $P_{v2} = 0 \text{ (W /m}^3)$

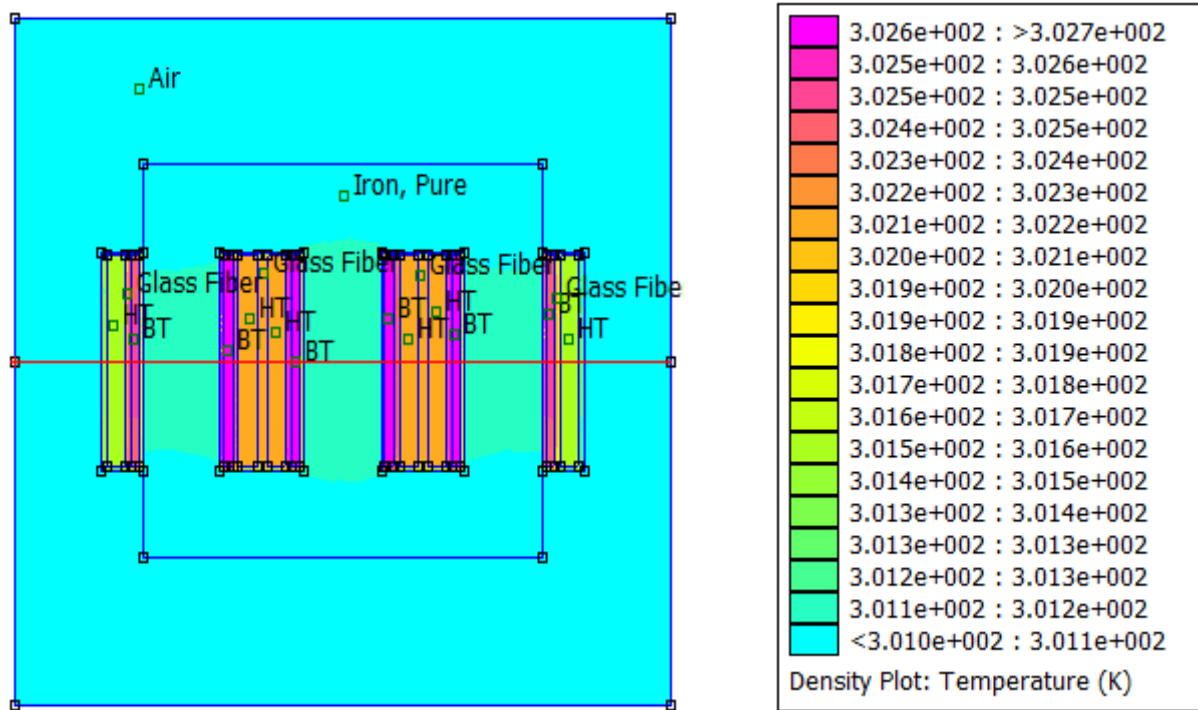


Figure-III-9- Répartition de température dans le transformateur.

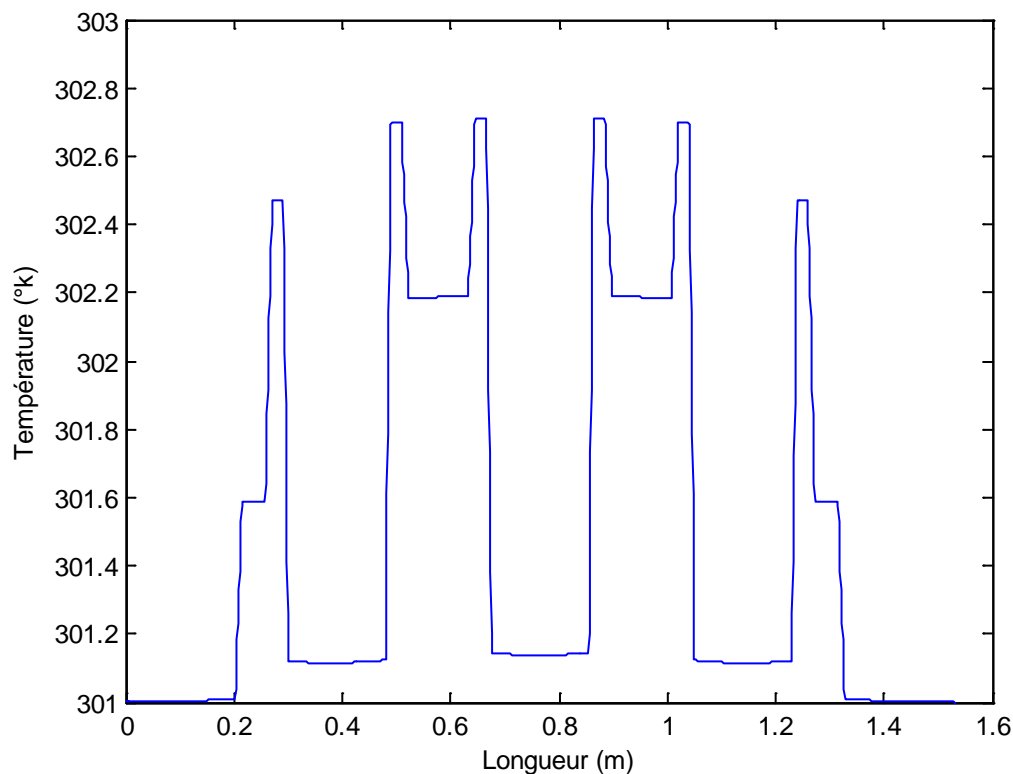


Figure-III-10- Courbe de la variation de température le long de la ligne rouge de la figure (-III-9-).

Interprétation des résultats :

Nous avons remarqué que la température dans le transformateur est distribuée de façon non uniforme. La définition du matériau isolant comme entourant uniquement le cuivre lui-même supposé homogène dans les surfaces à l'intérieur du matériau de la fibre de verre fait jouer au matériau isolant électrique également le rôle de matériau d'isolant thermique ce qui est vrai et faut que la température du matériau conducteur augmente excessivement. Nous remarquons également que plus la charge augmente plus la température maximale dans le transformateur est élevée. Aussi cette dernière est plus élevée dans les cas de la prise en compte des pertes fer par rapport aux cas où elle est négligée. Le cas à vide, montre une température presque inchangée par rapport à la température ambiante de l'air.

III-5-2- Le coefficient de conduction équivalent aux matériaux de l'enroulement :

La distribution des conducteurs en cuivre dans les enroulements primaire et secondaire étant discrets et pour tenir compte de cette réalité, il est recommandé de chercher une valeur équivalente au coefficient de conduction thermique de l'ensemble des conducteurs en cuivre ; matériaux isolants mais aussi l'air entre eux. Sans être dans un calcul précis et pour juste montrer l'influence de ce coefficient sur la distribution des températures dans le transformateur nous nous proposons de faire une étude en partons d'une valeur arbitrairement choisie égal à 50 W/(m*k).

III-5-2-1- Cas du point nominal :

a- Avec les pertes Joule volumiques seules :

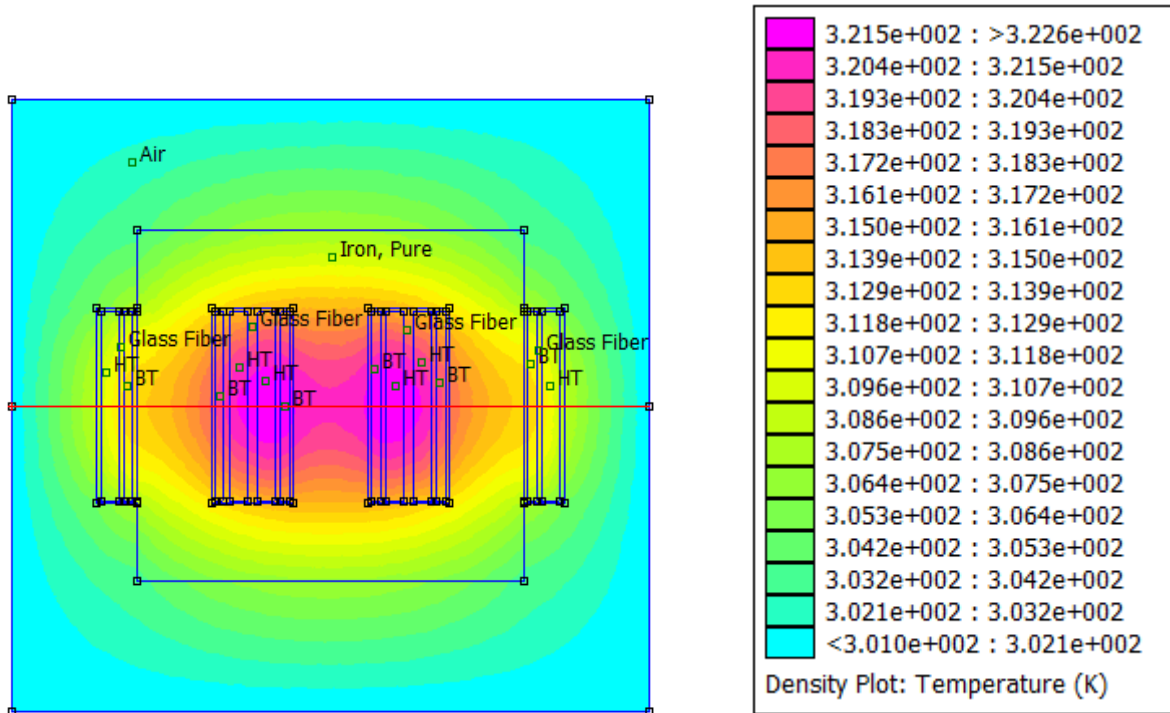


Figure-III-11- Répartition de température dans le transformateur.

b- Avec la considération des pertes fer :

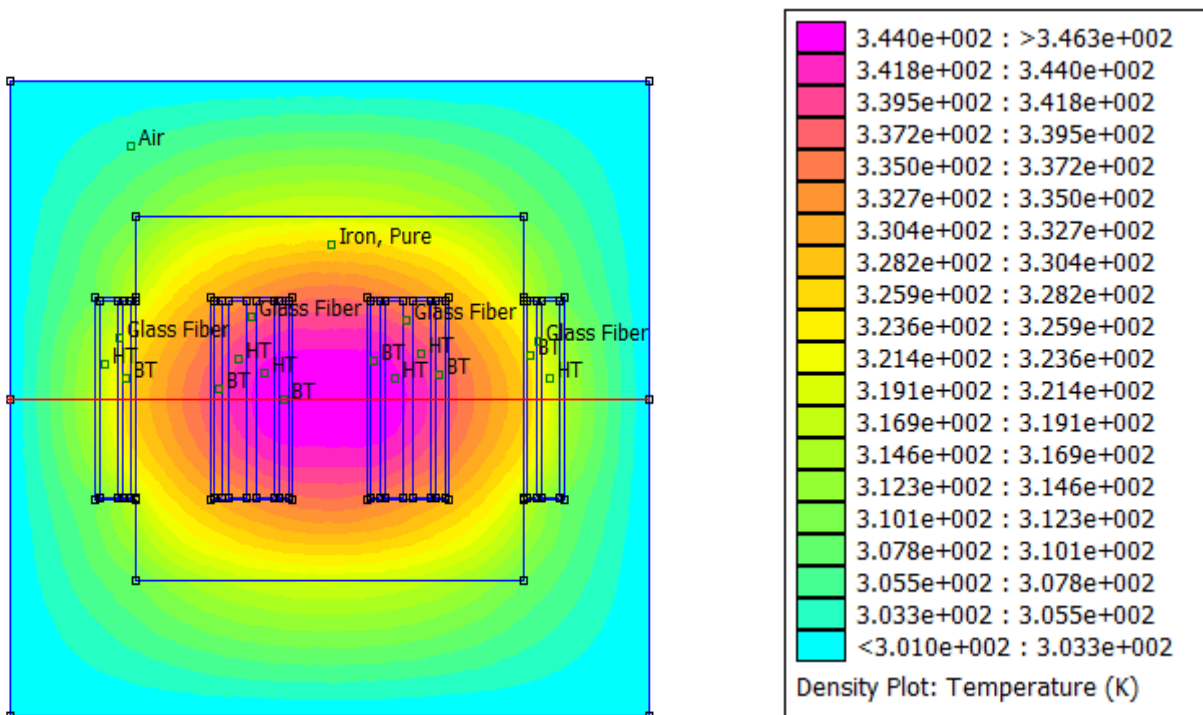


Figure-III-12- Répartition de température dans le transformateur.

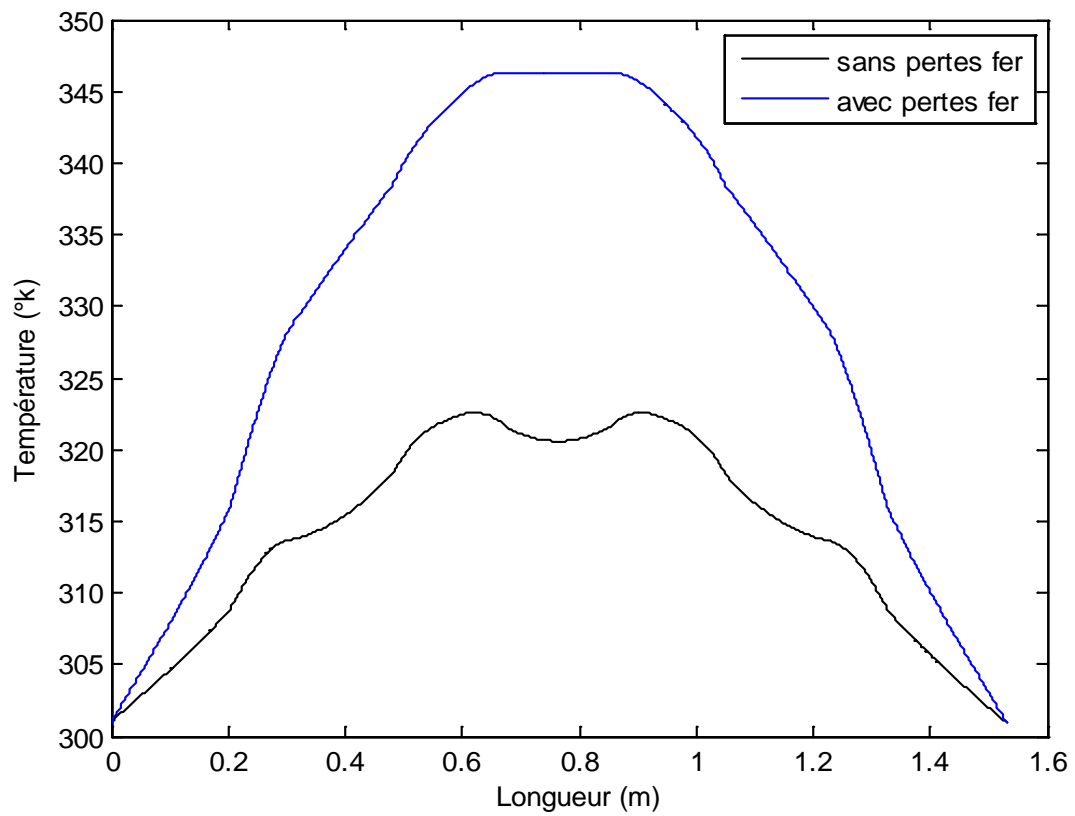


Figure-III-13- Courbes de la variation de température le long de la ligne rouge des figures (-III-11-) et (-III-12-).

III-5-2-2- Cas de demi charge :

c- Avec les pertes Joule uniquement :

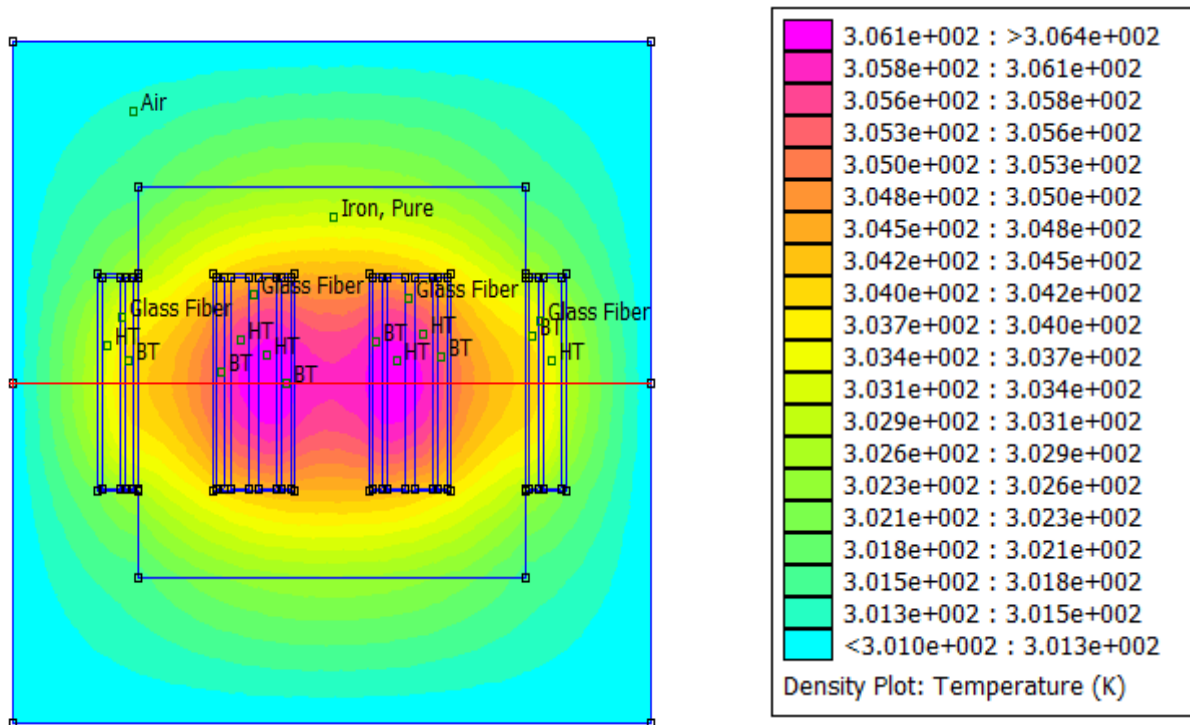


Figure-III-14- Répartition de température dans le transformateur.

d- Avec les pertes fer :

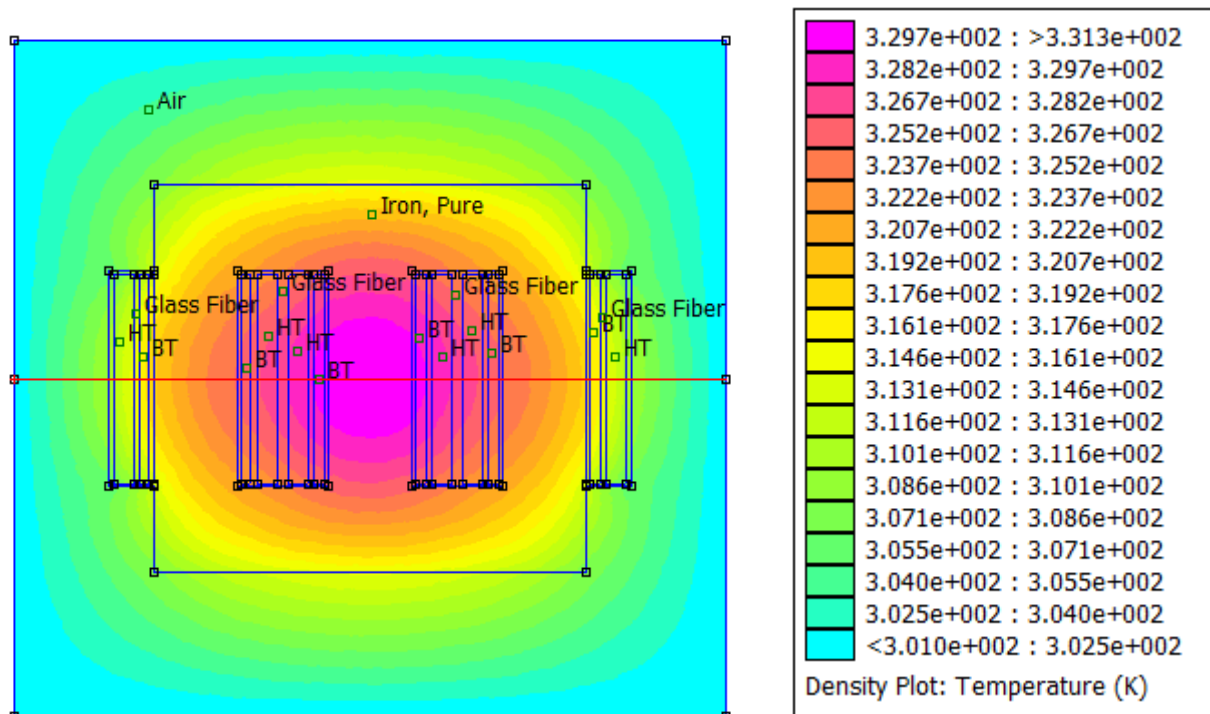


Figure-III-15- Répartition de température dans le transformateur.

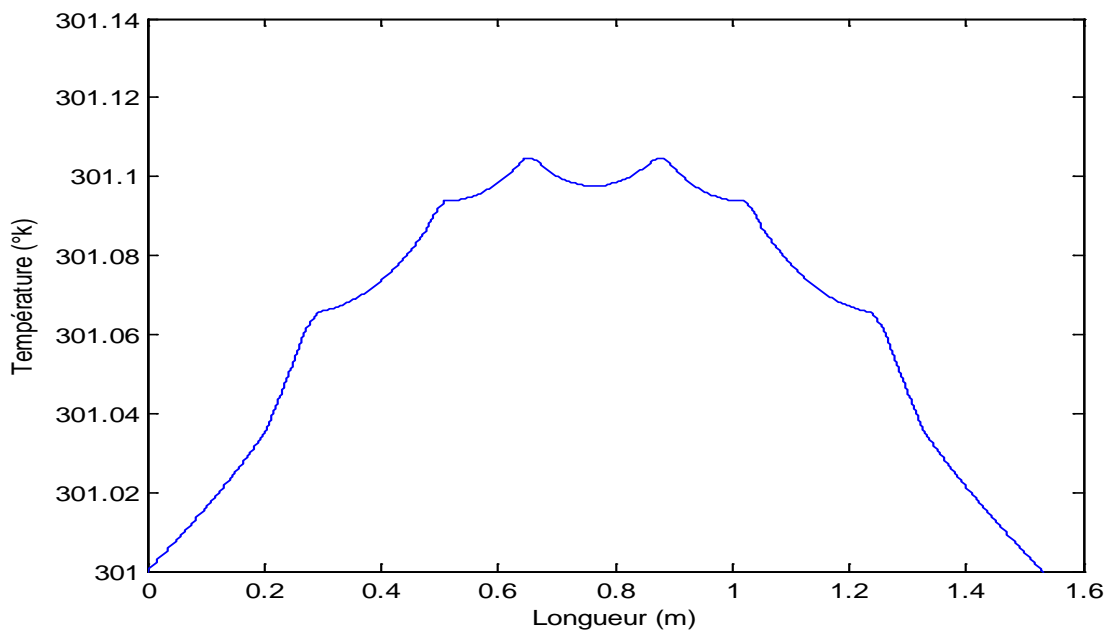


Figure-III-18- Courbe de la variation de température le long de la ligne rouge de la figure (-III-17-).

Interprétation des résultats :

- Dans le cas nominal, on a vu que la température maximale au sein du transformateur avec des pertes joules et des pertes fer, est plus grand que celle des pertes joules seulement.
- Dans le cas demi charge, on a vu que la température maximale dans le transformateur est diminuée, par rapport à celle du cas nominal.
- Dans le cas à vide, on a vu que la température maximale est très voisine de celle de la température d'ambiante (301°K).
- Le coefficient de conduction équivalent aux matériaux de l'enroulement est pris égal à 50 [W/(m*K)], apporte une baisse importante de température au sein de transformateur. (Proche de celle de la température d'ambiante).
- Dans le cas de ce coefficient équivalent, on remarque que les températures dans le transformateur sont distribuées de façon continue par rapport au saut que constituait la barrière de l'isolant défini avec un coefficient très faible et dans une zone de largeur très mince.

III-5-3- Variation de l'épaisseur de l'isolant :

On prend le cas du point nominal avec des pertes fer et des pertes Joule.

Le coefficient de conduction équivalent aux matériaux de l'enroulement est pris égale à 50 W/(m*K)

On a fixé un maillage très fin dans la zone de l'isolant.

Essai 1 : l'épaisseur de l'isolant est 0.013 (m).

Maillage en éléments finis de transformateur :

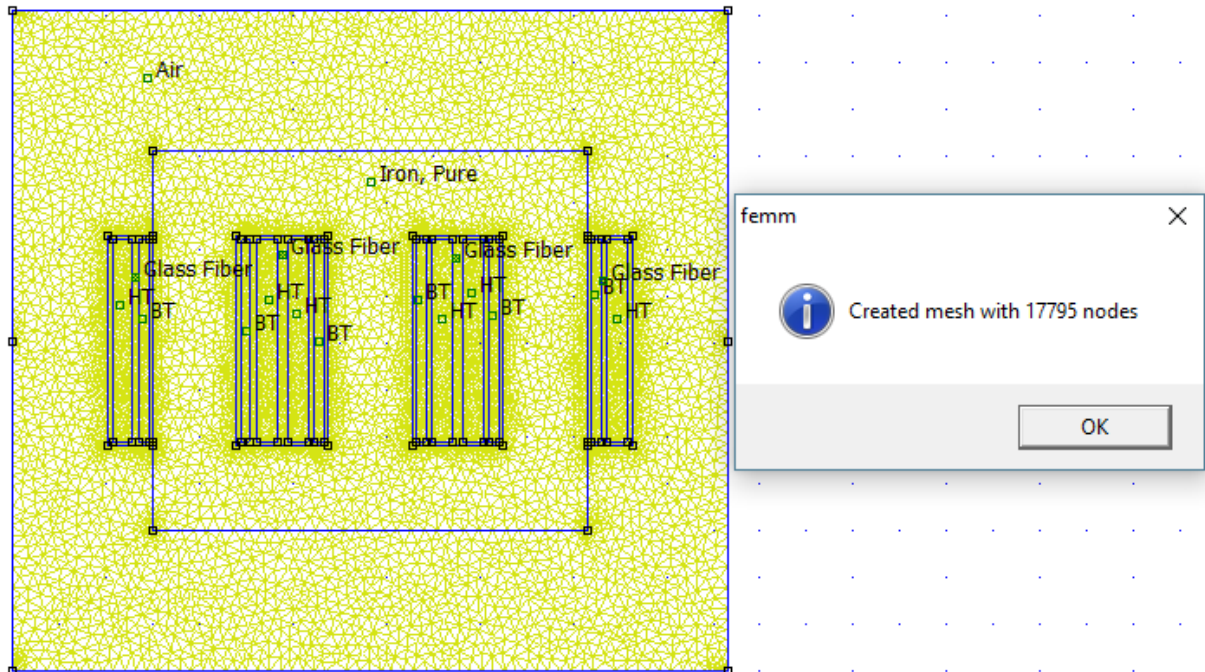


Figure-III-19- Maillage élément finis 2D du transformateur.

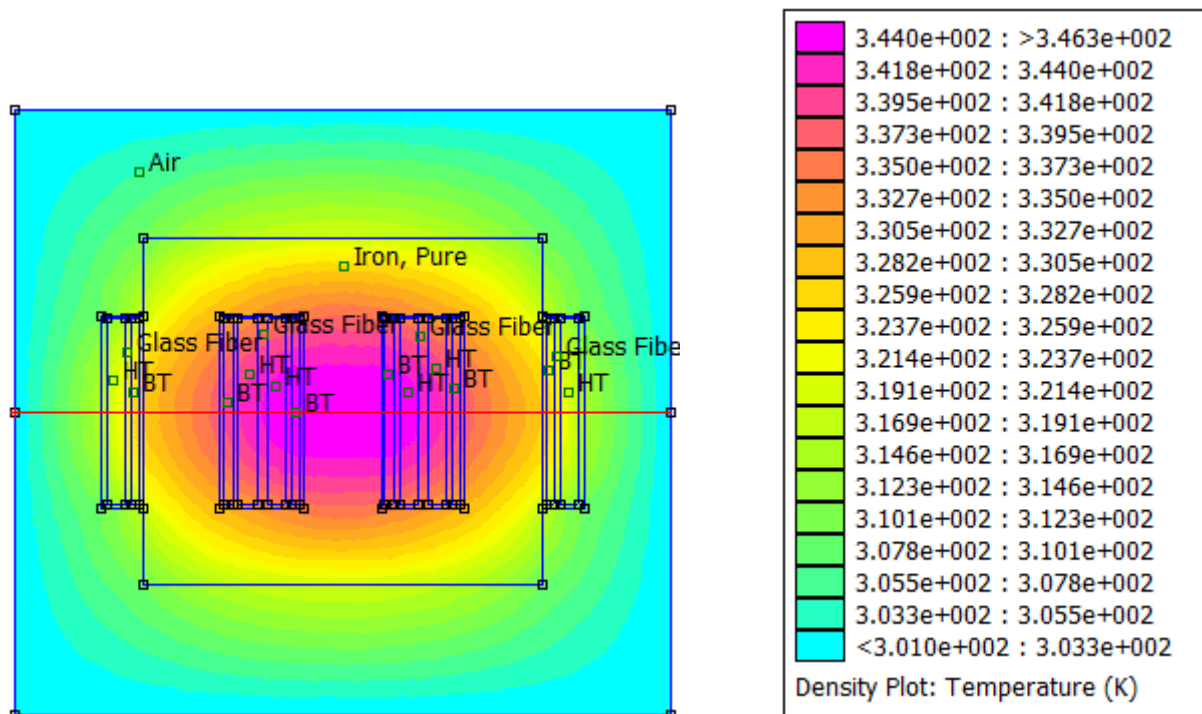


Figure-III-20- Répartition de température dans le transformateur.

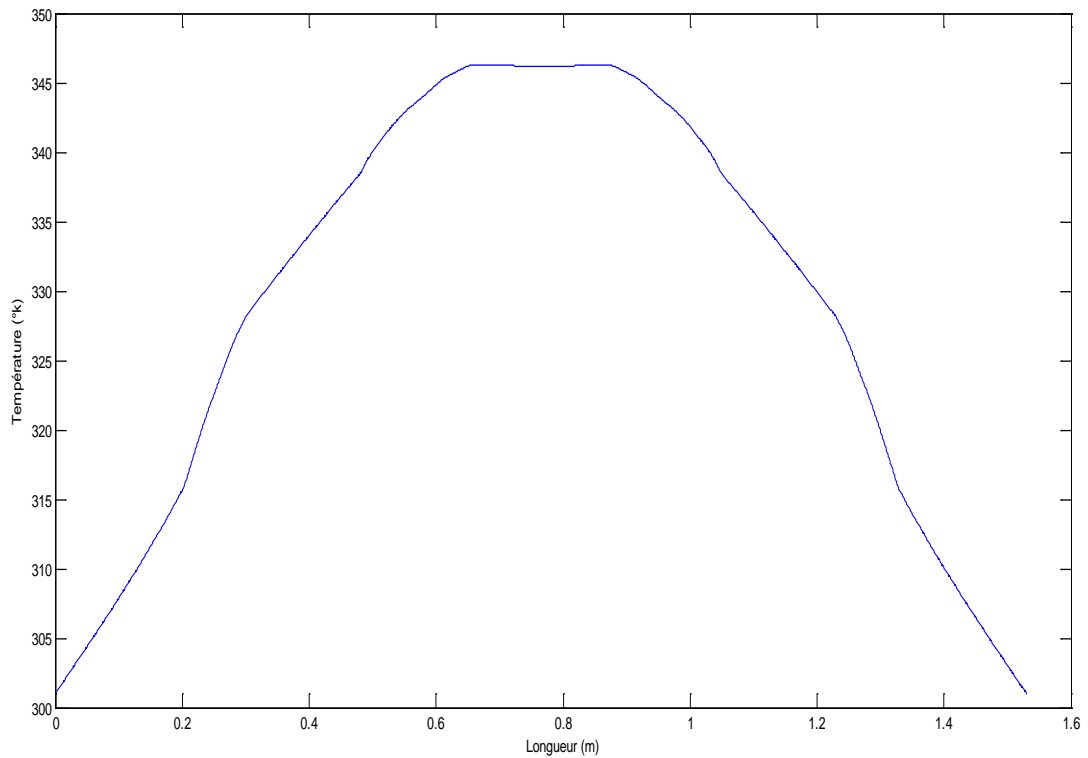


Figure-III-21- Courbe de la variation de température le long de la ligne rouge de la figure (-III-20-).

La température moyenne est de 339.737 °K.

e- Avec les mêmes étapes, on a varié l'épaisseur de l'isolant selon les valeurs du tableau III-4 suivant :

L'épaisseur de l'isolant (m)	0.009	0.011	0.013	0.015	0.017
Température moyenne (°k)	339.754	339.748	339.737	339.721	339.7

Tableau-III-4-Les valeurs de la température moyenne de l'isolant.

Les résultats précédents sont traduits par la courbe de la figure III-22.

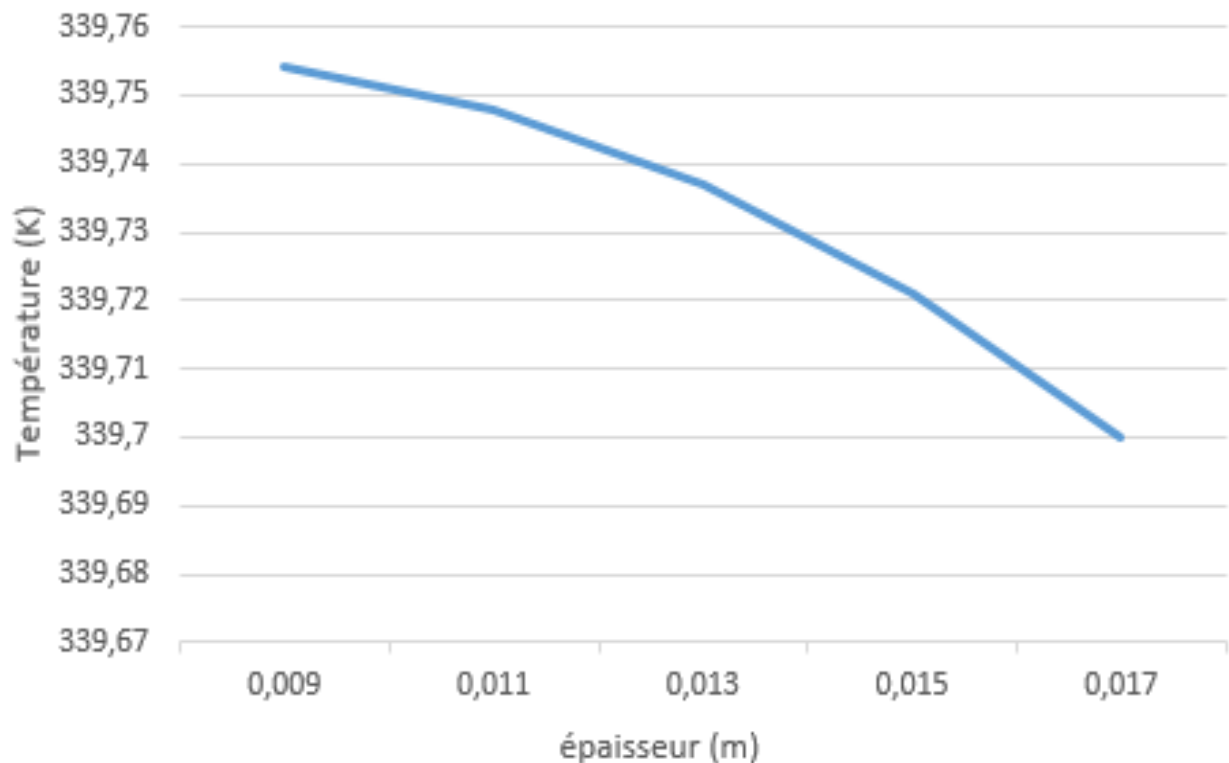


Figure-III-22- La variation de la température moyenne dans l'isolant en fonction de son épaisseur.

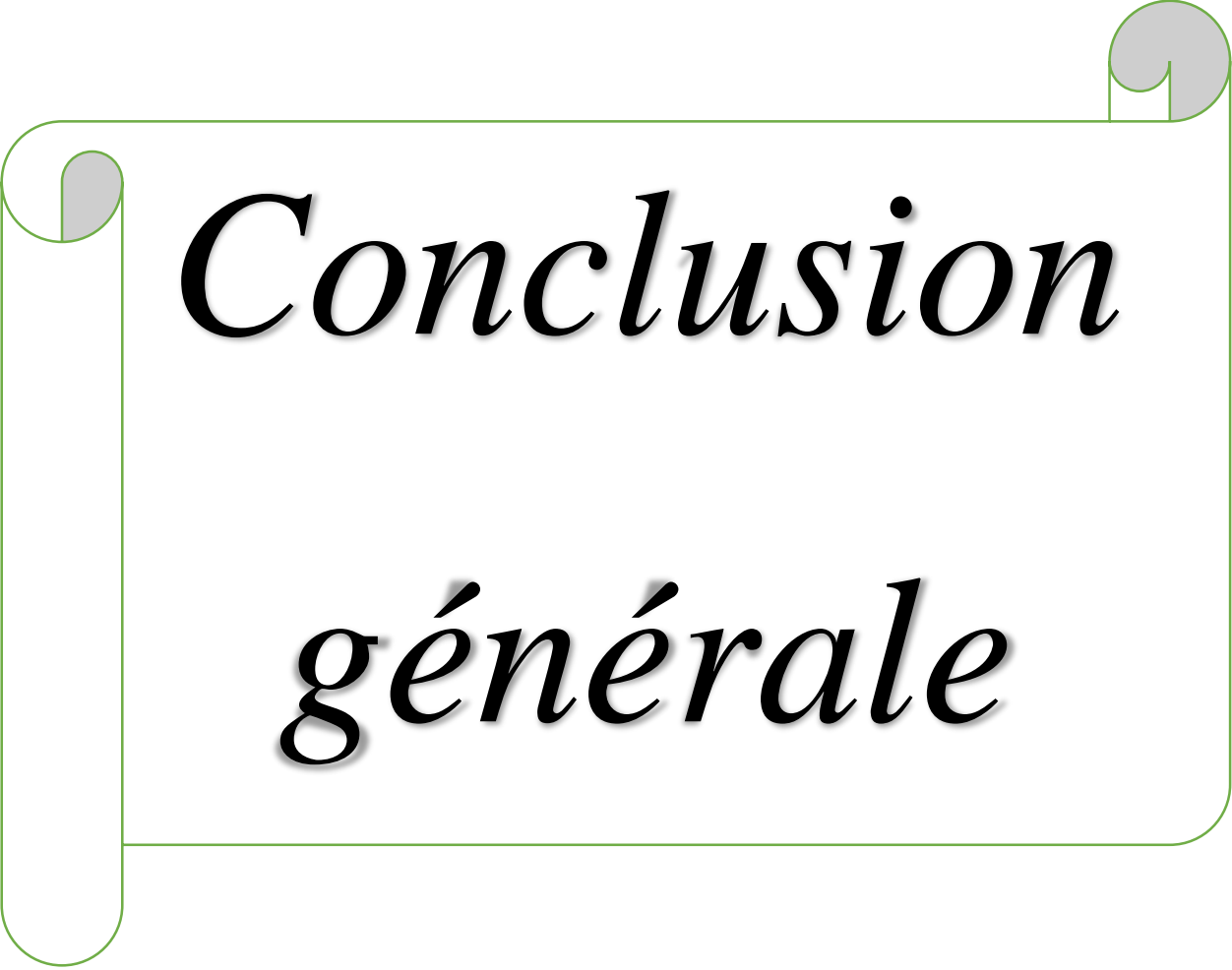
Interprétation des résultats :

On remarque qu'à chaque fois qu'on augmente l'épaisseur de l'isolant, la température moyenne de l'isolant diminue. C'est la traduction de la propriété d'isolant thermique de ce matériau.

Conclusion :

Ce transformateur est abaisseur de tension qui transforme une tension de 30 kV en une tension de 400 V, il y a forcément échauffement dû aux différentes pertes dans ce transformateur dont on a négligé les pertes supplémentaires qui ne peuvent être prises en compte dans une modélisation en 2D.

Dans ce chapitre, on a évalué les différentes pertes qui peuvent se produire dans le transformateur lors de son fonctionnement. En visualisant les résultats sous forme de courbes que nous avons obtenus, nous avons constaté que la température maximale dans le transformateur dépend du point de son fonctionnement mais aussi du modèle des matériaux donc des paramètres des matériaux composites qui constitue le transformateur étudié. A titre d'exemple, les enroulements qui sont constitués d'une distribution discrète de cuivre et d'isolant est d'une grande complexité pour aboutir au paramètre thermique équivalent à cette partie. Le travail réalisé ici permet de montrer combien cette tâche est délicate.

A decorative graphic of a scroll with a green border and grey circular accents at the corners. The text is centered within the scroll.

Conclusion
générale

Conclusion générale

Notre étude a porté sur la modélisation thermique d'un transformateur triphasé abaisseur de tension (30 kV / 400 V) couplé en triangle-étoile « Dy », fabriqué par Electro-industrie d'AZAZGA (ex-ENEL) de Tizi-Ouzou.

Les pertes dans un transformateur apparaissent sous forme de chaleur et donnent lieu à une augmentation de température (échauffement).

L'échauffement à l'intérieur du transformateur, qu'elle soit causée par les pertes cuivre et/ou fer, provoque un vieillissement accéléré de l'isolant. Ce dernier est le déterminant de la durée de vie du transformateur. D'où l'intérêt de la connaissance de la température maximale qu'atteignent les différentes parties du transformateur notamment celle de l'isolant.

Tout d'abord, Nous avons décrit le transformateur étudié, ses données géométriques, ses différents paramètres (Puissance apparente, nombre de phase, fréquence d'alimentation, nombre de spires aux primaires, nombre de spires au secondaire...etc), sa constitution et son principe de fonctionnement. Ensuite, nous avons fait l'étude avec les différentes pertes qu'on rencontre dans ce transformateur et pour différents modes de fonctionnement (régime nominal, demi charge, et à vide).

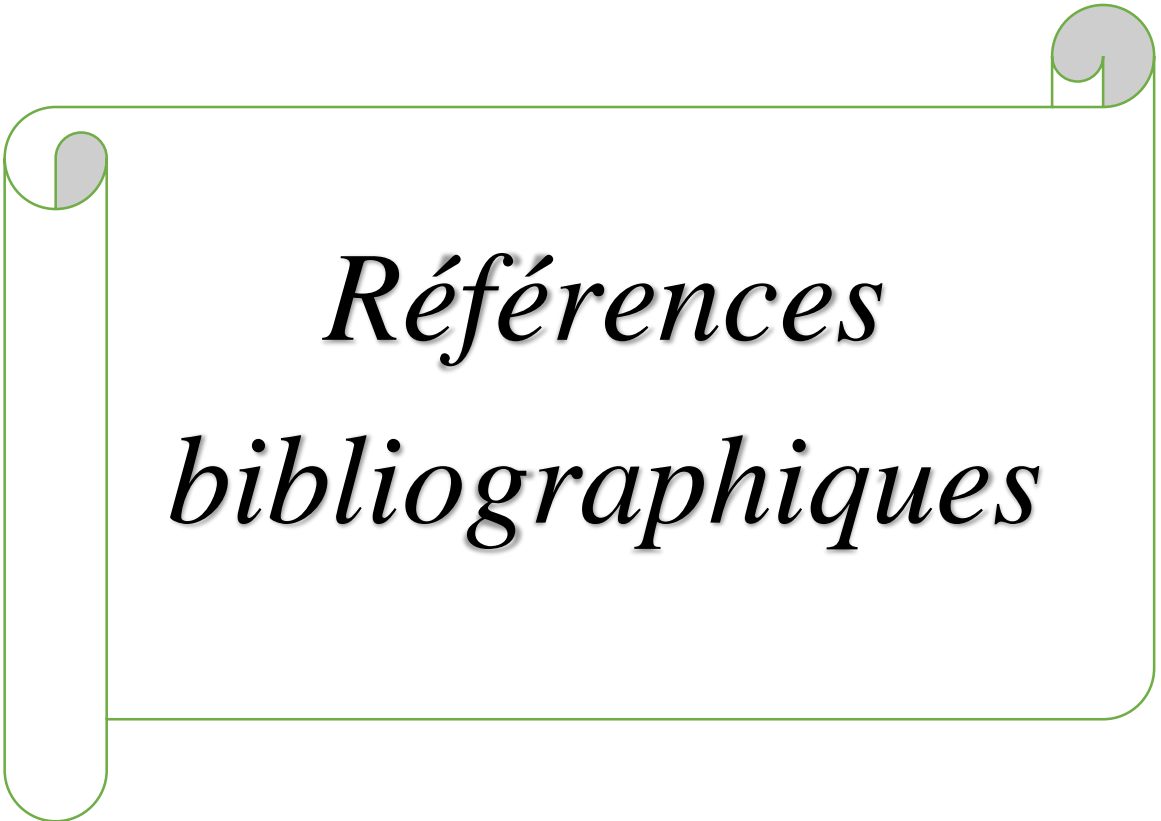
L'élaboration du présent travail, nous a permis d'améliorer nos connaissances dans le domaine de la modélisation thermique du transformateur triphasé. La théorie du champ thermique dans les transformateurs reste assez compliquée à cerner surtout quand on a affaire à des matériaux distribués discrètement mais aussi avec des dimensions et des épaisseurs variant dans de grands rapport d'un matériau à l'autre. Les simulations numériques menées à terme nous apprennent à manipuler le logiciel FEMM basé sur la méthode des éléments finis.

Les résultats de ces calculs permettent de mieux comprendre le phénomène d'échange thermique dans le transformateur étudié mais aussi de pouvoir envisager la possibilité de faire varier certains paramètres géométriques ou autres et noter l'effet sur la température maximale dans le système. Certains résultats sont prévisibles comme l'augmentation de la température dans les conducteurs en cuivre qui s'explique par le fait que le matériau isolant électrique joue aussi le rôle d'isolant thermique. Il est important ; dans le cas des transformateurs comme dans d'autres système d'électrotechnique (machines électriques) de pouvoir choisir l'épaisseur de cet isolant en faisant attention à ne pas dépasser la température de curie (de fusion) de ce matériau.

Dans la partie thermique, les échauffements calculés sont raisonnables, ce qui confirme le bon choix effectué au niveau du calcul électromagnétique (dimensions du circuit magnétique et des enroulements).

Cette étude peut être poursuivie dans différentes directions comme par exemple :

- L'optimisation des isolants utilisés en choisissant l'isolant et son épaisseur adéquats.
- La mise en œuvre pratique du couplage magnéto-thermique du calcul d'un transformateur.



*Références
bibliographiques*

Bibliographie :

- [1] M. KOSTENKO et L. PIOTROVSKI : "Machines électriques", Tome I, éditions MIR, Moscou, 1976.
- [2] A. BERFAS M. NEKACHE, « calcul et exploitation d'un transformateur triphasé de puissance 25/30 MVA-30kV/5,875kV », mémoire fin d'études ingénieur d'état en Electrotechnique, Université Mouloud MAMMERI, TIZI-OUZOU. 2010.
- [3] Mr. AMRANI Omar, « Etude des surtensions impulsionnelles dans les enroulements de réglage des transformateurs et autotransformateurs », Mémoire de Magister, Université Mouloud MAMMERI, TIZI-OUZOU, 2009.
- [4] Melle. Rahma Kachenoura, Mr. M'hand Mekious, « Etude des essais normalisés des Transformateurs de puissance MT/BT », Mémoire de Fin d'Etudes de master professionnel, Université Mouloud MAMMERI de TIZI OUZOU, 2016.
- [5] Piere Mayé : "aide- mémoire électrotechnique, l'usine nouvelle", Dunod, Paris, 2006.
- [6] Piere Agati, Guy Chateinger, Daniel Bouix, Michel Boes, et Jackes vaillant. "Aide-mémoire électricité, électronique de puissance, électrotechnique", 2ème édition, Dunod, Paris, 1995, 2006.
- [7] Mr : BELASSEL, « Calcul et dimensionnement d'un autotransformateur triphasé à trois enroulements 32MVA 230KV/121KV/38,5KV », Mémoire de fin d'études ingénieur, Université Mouloud MAMMERI de TIZI OUZOU, 2009.
- [8] Anthony Lefèvre : "Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs : Application à l'étude de l'échauffement sur charges non linéaires Energie électrique", thèse de doctorat, Université de Nantes, 2006.
- [9] Mathieu Rossi : "Conception optimale et multi-physique de composants passifs de puissance exploités dans le domaine ferroviaire", thèse de doctorat, Ecole Doctorale SPI 072 (Lille I, Lille III, Artois, ULCO, UVHC, EC Lille) PRES Université Lille Nord-de-France, 2013.
- [10] Mr M. AFETTOUCHE, Mr. T. ARAB « Etude d'un transformateur de puissance triphasé par la méthode des éléments finis », Mémoire de fin d'études ingénieur, Université Mouloud MAMMERI de TIZI OUZOU, 2010.
- [11] <https://illustrationprize.com/fr/692-types-of-losses-in-a-transformer.html>.