

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



جامعة غرداية
Université de Ghardaïa

كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
قسم الآلية والكهروميكانيك



Département d'automatique et d'électromécanique
Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et systèmes

Thème

**Etude du comportement thermique
d'un transformateur triphasé**

Présenté par :

BELMAZOUZI Sohaib et KIOUS Abdeslam

Soutenu publiquement le 17/09/2024

Devant le jury composé de :

BECHOUAT Mohcene

Professeur

Université de Ghardaïa

Président

HACHANI Kelthoum

MCB

Université de Laghouat

Encadreur

MOSBAH Said

MCB

Université de Ghardaïa

Examineur

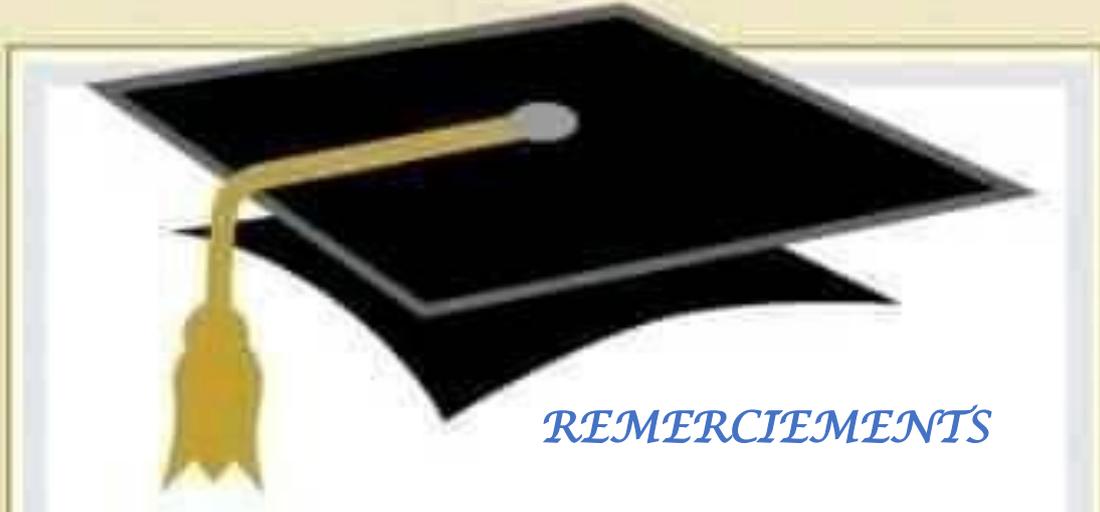
BENOUDINA Belkhair

MCB

Université de Ghardaïa

Examineur

Année universitaire 2023/2024



REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions en premier lieu le bon Dieu de nous avoir donné la santé, la volonté, le courage, et la patience d'achever ce modeste travail dans de bonnes conditions.

*Nous adressons nos sincères remerciement à notre encadreur **Mlle Dr. K. HACFANI** enseignante à l'université de Ammar Telidji - Laghouat, pour nous avoir suivi et guidé du début à la fin de ce projet, qu'elle trouve ici notre profonde gratitude et toute notre reconnaissance.*

Nous remercions les membres de jury qui ont fait l'honneur de participer au Jugement de ce travail.

Un grand Merci à tous les enseignants de la faculté sciences et de technologie de L'université de Ghardaïa.

Nous remercions enfin toute personne de près ou de loin qui a participé pour rendre ce travail réalisable et présentable.





DEDICACES

Je dédie ce travail 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

Mes frères et sœurs pour leurs soutiens et encouragements.

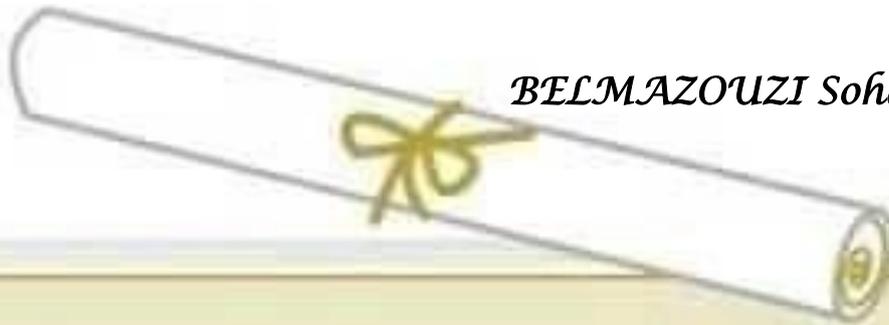
Ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

Mon cher binôme, ami et frère KIOUS Abdessalam.

Mes collègues pour leurs aides, tout au long de réalisation de ce travail.

Qui je témoigne toute ma reconnaissance et mes sincères remerciements.

Tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.



BELMAZOUZI Sohaïb



DEDICACES

Je dédie ce travail 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

Mes frères et sœurs pour leurs soutiens et encouragements.

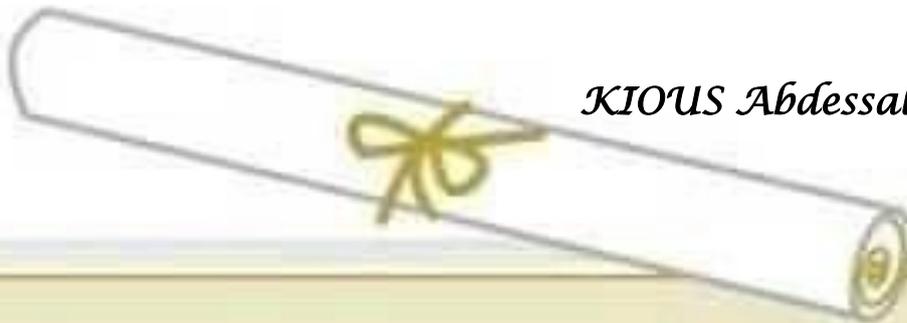
Ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

Mon cher binôme, ami et frère BELMAZOUZI Sohaïb.

Mes collègues pour leurs aides, tout au long de réalisation de ce travail.

Qui je témoigne toute ma reconnaissance et mes sincères remerciements.

Tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.



KIOUS Abdessalam

ملخص

تهدف دراسة السلوك الحراري للمحول الكهربائي ثلاثي الطور على فهم كيفية توزيع وتبدد الحرارة داخل المحول أثناء التشغيل، التي تنتج عادة بسبب خسائر الحديد والنحاس، في هذه الدراسة تم إنشاء نموذج ثنائي الأبعاد لمحول كهربائي خافض ثلاثي الطور بقدرة 630 KVA تم تصميمه باستخدام برنامج SolidWorks، وبعدها تم استخدام برنامج COMSOL Multiphysics في المحاكاة حيث اعتمدنا على طريقة العناصر المحدودة في تحليل انتقال الحرارة داخل المحول بهدف تقييم التوزيع الحراري بأجزاء المحول وهي اللفات والقلب ومواد العازلة، أيضًا تحليل تأثير العوامل المختلفة الأخرى مثل الحمل الكهربائي والتغيرات في درجة الحرارة المحيطة بالمحول. إن فهم هذه العوامل يضمن عدم تجاوز درجات الحرارة القصوى التي قد تؤدي إلى تدهور المواد العازلة وتعطل المحول، ويضمن تصميم محولات ذات كفاءة وموثوقية.

الكلمات الرئيسية

للمحول الكهربائي ثلاثي الطور - السلوك الحراري - SolidWorks – COSMOL Multiphysics - طريقة العناصر المحدودة - انتقال الحرارة

RESUME

L'étude du comportement thermique d'un transformateur triphasé vise à comprendre comment la chaleur est distribuée et dissipée à l'intérieur du transformateur pendant son fonctionnement, ce qui est généralement dû aux pertes de fer et de cuivre , Dans cette étude, un modèle 2D d'un transformateur abaisseur triphasé de 630 KVA a été créé à l'aide de SolidWorks, puis COMSOL Multiphasiques a été utilisé pour la simulation, où nous nous sommes appuyés sur la méthode des éléments finis pour analyser le transfert de chaleur à l'intérieur du transformateur, évaluer la distribution thermique des pièces du transformateur, à savoir les enroulements, le noyau et les matériaux d'isolation, également analyser l'effet de divers autres facteurs tels que la charge électrique et les changements de la température ambiante du transformateur. La compréhension de ces facteurs permet de s'assurer que les températures maximales ne sont pas dépassées, ce qui peut entraîner une dégradation de l'isolation et une défaillance du transformateur, et garantit la conception de transformateurs efficaces et fiables.

Mots clés

Transformateur triphasé – Comportement thermique – SolidWorks – COSMOL Multiphasiques
– Méthode des éléments finis – Transfert de chaleur

ABSTRACT

The study of the thermal behaviour of a three-phase transformer aims to understand how heat is distributed and dissipated within the transformer during operation, which is usually caused by iron and copper losses, In this study, a 2D model of a 630 KVA three-phase step-down transformer was created using SolidWorks, and then COMSOL Multiphysics was used in the simulation, where we relied on the finite element method to analyse the heat transfer inside the transformer, to evaluate the thermal distribution of the transformer parts, namely the windings, core and insulation materials, also to analyse the effect of various other factors such as electrical load and changes in the ambient temperature of the transformer. Understanding these factors ensures that maximum temperatures are not exceeded, which can lead to degradation of the insulation and failure of the transformer, and ensures the design of efficient and reliable transformers.

Key words:

Three-phase transformer - Thermal behaviour - SolidWorks - COMSOL Multiphysics - Finite element method - Heat transfer

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Généralités sur les transformateurs

Figure I.1 Circuit magnétique d'un transformateur triphasé	17
Figure I.2 Technologies de bobinages des transformateurs	18
Figure I.3 Partie constructive du transformateur	20
Figure I.4 Plaque Signalétique du transformateur de puissance	21
Figure I.5 Symboles électriques du transformateur monophasé	22
Figure I.6 Symboles du transformateur triphasé	22
Figure I.7 Noyau magnétique	22
Figure I.8 Transformateur de puissance	24
Figure I.9 Transformateur monophasé	24
Figure I.10 Transformateurs de courant	25
Figure I.11 Transformateurs de tension	25
Figure I.12 Symbole du transformateur triphasé	26
Figure I.13 Transformateur triphasé	26
Figure I.14 Couplage de Transformateur triphasé	26
Figure I.15 Indice horaire	27
Figure I.16 Enceinte grillagée de transformateur	28
Figure I.17 Cuve du transformateur	29
Figure I.18 Radiateur du transformateur	29
Figure I.19 Cuve contenant des tubes	30
Figure I.20 ONAN	31
Figure I.21 OFAF	31
Figure I.22 ODAF	32
Figure I.23 Relais Buchholz	33
Figure I.24 Schéma d'un relais Buchholz	33
Figure I.25 Protection de masse cuve	33
Figure I.26 DGPT	34
Figure I.27 Indicateurs de température et indicateurs de température de l'huile	34
Figure I.28 Éclateur et Parafoudre	35
Figure I.29 Schéma de protection différentielle à haute impédance	36
Figure I.30 Fusibles et Disjoncteur	36
Figure I.31 Cellule de protection	37
Figure I.32 Relais de protection SEPAM	37

Chapitre II : Transfert thermique

Figure II.1 Conduction thermique dans un solide sous une différence de température	41
Figure II.2 Échange thermique par convection	43
Figure II.3 Transfert de chaleur par rayonnement	44
Figure II.4 Bloc homogène contenant une source de chaleur surfacique	45
Figure II.5 Géométrie et conditions aux limites	46
Figure II.6 Organigramme du programme de la simulation du couplage électromagnétique-thermique	53
Figure II.7 Courbe de Pertes Par hystérésis	56
Figure II.8 Courants de Foucault	57

Chapitre III : Etude du comportement thermique d'un transformateur triphasé

Figure III.1 Configuration géométrique transversale 2D du transformateur triphasé	61
Figure III.2 Conditions aux limites sur le transformateur triphasé	64

Figure III.3 Maillage en éléments finis du système 2D du transformateur triphasé	65
Figure III.4 Induction magnétique dans le transformateur triphasé	65
Figure III.5 Répartition de température dans le transformateur sans pertes fer	67
Figure III.6 Répartition de température dans le transformateur avec en compte des pertes fer...	68
Figure III.7 Courbe de la variation de température dans différentes zones de transformateur le long de la ligne soulignée en rouge des figures (III.5) et (III.6)	69
Figure III.8 Répartition de température dans le transformateur $d=0.013$ m	70
Figure III.9 Répartition de température dans le transformateur $d=0.009$ m	70
Figure III.10 Répartition de température dans le transformateur $d=0.005$ m	71
Figure III.11 Courbe de la variation de température dans différentes zones du transformateur le long de la ligne rouge de figure (III.8)	71
Figure III.12 Courbe de la variation de température dans différentes zones du transformateur le long de la ligne rouge de figure (III.9)	72
Figure III.13 Courbe de la variation de température dans différentes zones du transformateur le long de la ligne rouge de figure (III.10)	72
Figure III.14 Répartition de température dans le transformateur $d=0.013$ m avec des pertes variables	74
Figure III. 15 Répartition de température dans le transformateur $d=0.009$ m avec des pertes variables	75
Figure III.16 Répartition de température dans le transformateur $d=0.005$ m avec des pertes variables	76
Figure III.17 Courbes de la variation de la température le long de la ligne soulignée en rouge sur la figure (III.14)	76
Figure III.18 Courbes de la variation de la température le long de la ligne soulignée en rouge sur la figure (III.15)	77
Figure III.19 Courbes de la variation de la température le long de la ligne soulignée en rouge sur la figure (III.16)	77
Figure III.20 Courbe de la variation de la température en fonction du temps à un point d'air ..	78
Figure III.21 Courbe de la variation de la température en fonction du temps à un point d'isolateur	79
Figure III.22 Courbe de la variation de la température en fonction du temps à un point de noyau	79
Figure III.23 Courbe de la variation de la température en fonction du temps à un point de bobine HT	80
Figure III.24 Courbe de la variation de la température en fonction du temps à un point de bobine BT	80
Figure III.25 Densité des pertes Joule volumiques en fonction du temps de bobine HT	81
Figure III.26 Densité des pertes Joule volumiques en fonction du temps de bobine BT	81

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : Généralités sur les transformateurs

Tableau I.1 Les caractéristiques de transformateur.....21

Tableau I.2 Signification des symboles.....30

Chapitre II : Transfert thermique

Tableau II.1 Analogies entre la loi de Fourier et la loi d'Ohm51

Chapitre III : Etude du comportement thermique d'un transformateur triphasé

Tableau III.1 Diagramme de différentes étapes de résolution dans COMSOL Multiphasiques
.....60

Tableau III.2 Données géométrique du transformateur triphasé62

Tableau III.3 Données électriques du transformateur triphasé62

Tableau III.4 Matériaux utilisés dans le transformateur triphasé63

Tableau III.5 Nouvelles valeurs des pertes au niveau des bobines HT et BT ($d=0.013m$)73

Tableau III.6 Nouvelles valeurs des pertes au niveau des bobines HT et BT ($d=0.009m$)74

Tableau III.7 Nouvelles valeurs des pertes au niveau des bobines HT et BT ($d=0.005$)75

LISTE DES ABRÉVIATIONS

HT : Haute tension.

BT : Basse tension.

CT : Transformateur de courant.

PT : Transformateur de potentiel.

ONAN: Oil Natural-Air Natural.

ONAF: Oil Natural-Air Force.

OFAF: Oil Force-Air Force.

ODAF: Oil Directed- Air Force.

DGPT : Détecteur Gaz, Pression et Température.

SEPAM : System Electronique Protection Automatismes Mesure.

CFD : Computational Fluid Dynamics.

EP : Électroniques de puissance.

DCT : Transformée en cosinus discrète.

IDCT : Inverse transformée en cosinus discrète.

FEM : Méthode des éléments finis.

FVM : Méthode des volumes finis.

FDM : Méthode des différences finies.

LISTE DES SYMBOLES

- m_c** : Rapport de transformation par colonne
 N : Nombre de spire
 m : Rapport de transformation par phase
 U : Tension [V]
 λ : Conductivité thermique du matériau en [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
 φ : Densité de flux de la chaleur [$W \cdot m^{-2}$]
 T : Température [K]
 Φ_{conv} : Flux de chaleur transmis par convection [W]
 h : Coefficient de transfert de chaleur par convection [$W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$]
 T_s : Température de surface du solide [$^\circ C$]
 T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide [$^\circ C$]
 S : Aire de la surface de contact solide/fluide [m^2]
 Φ_{ray} : Flux de chaleur transmis par rayonnement [W]
 σ : Constante de Stephan [$5,670 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$]
 ε : émissivité, indice valant 1 pour un corps noir et qui est compris entre 0 et 1 selon l'état de surface du matériau
 T : Température du corps [K]
 $\frac{\partial n}{\partial T}$: Dérivée de la température le long de la normale
 \vec{n} : Vecteur unitaire de la normale
 Q : Quantité de chaleur (en J)
 m : Masse du système (en kg)
 c : Capacité thermique massique du système (en $J/kg \cdot ^\circ C$)
 ΔT : Variation de température du système (en $^\circ C$)
 c_v : Capacité thermique massique à volume constant.
 ρ : Masse volumique
 p : Puissance volumique dégagée (par exemple dans le cas d'un résistor, p est la puissance dissipée par effet Joule)
 ∇ : Nabla
 $\vec{\nabla}^2$: Laplacien
 S : Surface d'échange
 R : Résistance thermique exprimée en mètre carré Kelvin par Watt ($m^2 \cdot K/W$)
 e : Epaisseur du matériau exprimé en mètre
 C_h : Coefficient d'hystérésis, dépendant de la nature matériau
 B_m : Valeur maximale de l'induction
 f : Fréquence de l'alimentation
 x, y : Coordonnées spatiales
 q : Densité volumique de chaleur
 I : Intensité du courant électrique traversant le conducteur (A)
 ρ : Désigne la masse volumique du fluide [$Kg \cdot m^{-3}$]
 r : Représente la perte de chaleur volumique due au rayonnement [$J \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$]
 \vec{f} : Désigne la résultante des forces massiques s'exerçant dans le fluide [$N \cdot Kg^{-1}$]
 \vec{v} : Désigne la vitesse eulerienne d'une particule fluide [$m \cdot s^{-1}$]
 e : L'énergie totale par unité de masse [$J \cdot Kg^{-1}$]
 \vec{q} : Le flux de chaleur perdu par conduction thermique [$J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$]
 $\vec{\tau}$: Le tenseur des contraintes visqueuses [Pa]

TABLE DES MATIÈRES

Remerciement	
Dédicaces	
ملخص	1
Résumé	2
Abstract	3
Liste des figures	4
Liste des tableaux	6
Liste des abréviations	7
Liste des symboles	8
Introduction générale	12
Chapitre I : Généralités sur les transformateurs	
I.1 Introduction	16
I.2 Définition	16
I.3 Constitution	16
I.3.1 Partie active	16
I.3.1.1 Noyau (circuit magnétique)	16
I.3.1.2 Bobinage (enroulements)	17
I.3.1.3 Représentation des enroulements	18
I.3.2 Partie constructive	19
I.4 Isolation	20
I.5 Caractéristiques du transformateur	21
I.6 Symboles électriques du transformateur	21
I.7 Principe de fonctionnement	22
I.8 Type des transformateurs	23
I.8.1 Transformateur de puissance	23
I.8.2 Transformateur d'instrumentation	24
I.8.3 Transformateur monophasé	24
I.8.4 Transformateur de courant	25
I.8.5 Transformateur de potentiel	25
I.8.6 Transformateur triphasé	26
I.9 Échauffement et refroidissement des transformateurs	28

I.9.1 Échauffement	28
I.9.2 Refroidissement	28
I.9.3 Modes de refroidissement	30
I.10 Protection des transformateurs	32
I.10.1 Protection internes	32
I.10.1.1 Relais BUCHHOLZ	32
I.10.1.2 Protection masse cuve	33
I.10.1.3 Protection par DGPT	33
I.10.1.4 Protection thermique (thermostat)	34
I.10.2 Protection externes	35
I.10.2.1 Protection surtension	35
I.10.2.2 Protection différentielle	35
I.10.2.3 Protection contre les courts-circuits et les surcharges	36
I.10.2.4 Cellule de protection	36
I.11 Conclusion	38

Chapitre II : Transfert thermique

II.1 Introduction	40
II.2 Définition	40
II.3 Problèmes thermiques dans un transformateur	40
II.4 Modes de transfert thermique	41
II.4.1 Conduction.....	41
II.4.2 Convection.....	42
II.4.3 Rayonnement	43
II.5 Modélisation thermique	44
II.6 Méthodes de résolution	44
II.6.1 Méthodes analytiques	45
II.6.2 Méthode expérimentale	46
II.6.3 Méthodes numériques	47
II.7 Grandeurs thermiques	48
II.7.1 Température	48
II.7.2 Champ de température	49
II.7.3 Gradient de température	49
II.7.4 Quantité de température	49
II.7.5 Equation de la chaleur	49

II.7.6 Flux thermique	50
II.7.7 Densité de flux thermique	50
II.7.8 Conductivité thermique	50
II.7.8 Résistance thermique	51
II.8 Analogique thermique/électrique	51
II.9 Couplage Electromagnétique et Thermique	51
II.10 Transfert thermique dans le transformateur	54
II.11 Pertes dans le transformateur	55
II.11.1 Pertes par effet joule	55
II.11.2 Pertes fer	56
II.12 Conclusion	57
Chapitre III : Etude du comportement thermique d'un transformateur triphasé	
III.1 Introduction	59
III.2 Logiciel COMSOL Multiphysiques	59
III.3 Présentation du transformateur étudié	61
III.3.1 Dimensions géométriques	61
III.3.2 Propriétés électriques et les grandeurs nominales	62
III.4 Simulation du problème thermique	63
III.4.1 Équation à résoudre des problèmes thermiques	63
III.4.2 Conditions aux limites	64
III.4.3 Maillage en élément finis du transformateur	64
III.5 Etude du comportement thermique du transformateur en état d'équilibre	65
III.5.1 Flux magnétique dans le transformateur	65
III.5.2 Impact des pertes sur la distribution de la température dans le transformateur	66
III.5.3 Impacts de la variation de l'épaisseur des isolants sur la répartition de la température dans le transformateur	69
III.5.4 Impact combiné de la modification de l'épaisseur de l'isolant et des pertes volumiques sur la répartition de la température dans le transformateur.....	73
III.5.5 la variation de la température en fonction du temps dans différents zone de transformateur	78
III.6 Conclusion	82
Conclusion générale	83
Références bibliographiques	86

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

L'électricité revêt une grande importance dans notre vie quotidienne. Lorsque nous observons notre environnement, nous constatons que presque tous les lieux sont équipés d'appareils ou de machines électriques, que nous utilisons pour éclairer nos rues la nuit, pour nous chauffer en hiver et pour nous climatiser en été.

Les transformateurs électriques sont considérés comme l'une des découvertes les plus importantes dans le domaine de l'énergie électrique et il a une longue histoire qui remonte à plus d'un siècle, à commencer par le scientifique « Michael Faraday », qui était l'un des scientifiques les plus éminents dans ce domaine, où il a découvert l'induction électromagnétique en 1831, et en 1876. De son tour, « Lucien Gaulard » a mené des expériences sur les champs magnétiques rotatifs, qui ont contribué à la compréhension du fonctionnement des transformateurs. Puis, en 1885, « William Stanley », en collaboration avec « Westinghouse », a conçu le premier transformateur commercial efficace basé sur les principes de l'induction électromagnétique, ce qui a facilité la distribution généralisée de l'électricité.

Un transformateur électrique est un dispositif qui abaisse ou élève la tension électrique avec un changement opposé de la quantité de tension et de courant dans les deux circuits, où il transfère l'énergie électrique d'un circuit à l'autre sans changer la fréquence. Cela signifie que l'abaissement de la tension s'accompagne d'une augmentation du courant et vice versa. Les transformateurs abaisseurs de tension sont utilisés dans le réseau de distribution, par exemple pour convertir l'énergie électrique à moyenne tension (dizaines de milliers de volts) en énergie à basse tension utilisable par les consommateurs à 110 volts et 220 volts, tandis que les transformateurs éleveurs de tension sont utilisés dans les centrales électriques et pour élever des dizaines de fois la tension de l'énergie produite sur les lignes de transmission à haute tension.

Un transformateur triphasé est un appareil électrique stationnaire composé de trois phases alternées, chaque phase contenant deux enroulements isolés en cuivre ou en aluminium qui entourent un noyau de fer. Le transformateur triphasé est utilisé dans la station de production d'énergie électrique pour élever la tension, tandis que dans la station de distribution, il est utilisé pour abaisser la tension tout en conservant la même fréquence. Son principe de fonctionnement est basé sur la loi de Faraday de l'induction électromagnétique, où des courants électriques sont générés dans les bobines secondaires lorsqu'elles sont exposées à des champs magnétiques changeants résultant du courant alternatif dans les bobines primaires, et ce processus entraîne diverses pertes d'énergie, parmi lesquelles des pertes de fer dues au changement du champ magnétique dans le noyau de fer du transformateur, qui entraîne la génération de courants de

Introduction générale

Foucault qui circulent, causant une perte d'énergie. Outre les pertes de joule (cuivre), ces pertes résultent de la résistance du fil dans la bobine du transformateur et augmentent à mesure que la charge augmente.

Les transformateurs triphasés sont refroidis à l'air ou à l'huile pour éviter la surchauffe et garantir une efficacité de fonctionnement maximale. Les systèmes de refroidissement à l'huile sont souvent utilisés dans les grands transformateurs, où l'huile sert de support pour dissiper la chaleur à travers des radiateurs externes. En ce qui concerne la protection, les transformateurs comprennent des dispositifs de protection tels que des disjoncteurs, des relais thermiques et une protection différentielle qui déconnectent le transformateur en cas de défaut ou de surcharge pour le maintenir en état.

Cette mémoire se compose de trois chapitres :

- Le premier chapitre comprend les concepts de base des transformateurs, leurs types et leurs domaines d'utilisation. En outre, les méthodes et les moyens de refroidissement utilisés dans les transformateurs, ainsi que le principe de leur fonctionnement et les moyens de protection.
- Dans le deuxième chapitre, nous aborderons le processus de transfert de chaleur dans les transformateurs, ses méthodes et les différentes quantités de chaleur ainsi que les différentes pertes de chaleur dans les transformateurs triphasés.
- Quant au troisième chapitre, nous présentons des simulations numériques basées sur la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel COMSOL Multiphasiques avec le modèle géométrique du transformateur utilisant le logiciel SolidWorks, et nous étudions le comportement thermique de ce transformateur en nous concentrant sur l'évolution de la température en fonction du temps, les pertes de fer, les pertes de joule et les résultats obtenus.

Enfin, nous terminons ce mémoire par une conclusion générale.

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES TRANSFORMATEURS

I.1 Introduction

Les transformateurs sont des machines électriques électromagnétiques statiques, généralement utilisées pour transférer de l'énergie électrique entre des circuits. Leur fonction est d'abaisser ou d'augmenter la tension et courant du circuit électrique traversé par un courant alternatif sans modifier sa fréquence. Ils jouent donc un rôle essentiel dans la transmission de l'énergie électrique à distance, permettant une distribution efficace et sûre de l'énergie électrique.

Dans ce chapitre, nous parlerons des généralités sur les transformateurs électriques, en mentionnant leur principe de fonctionnement, leurs types, les modes de leur refroidissement et les moyens de protection.

I.2 Définition

Un transformateur est un appareil électrique statique à induction électromagnétique 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.3 Constitution

Le transformateur est un appareil d'induction qui est composé de deux parties principales :

I.3.1 Partie active

Elle est constituée essentiellement du circuit magnétique (le noyau), et électrique (bobinage). Elle est destinée à conversion d'énergie électrique.

I.3.1.1 Noyau (circuit magnétique)

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

La fonction principale du circuit magnétique est de canaliser le flux magnétique, mais elle sert aussi comme support aux enroulements. Ce circuit magnétique comporte trois colonnes réunies par deux culasses (**figure I.1**) [2].

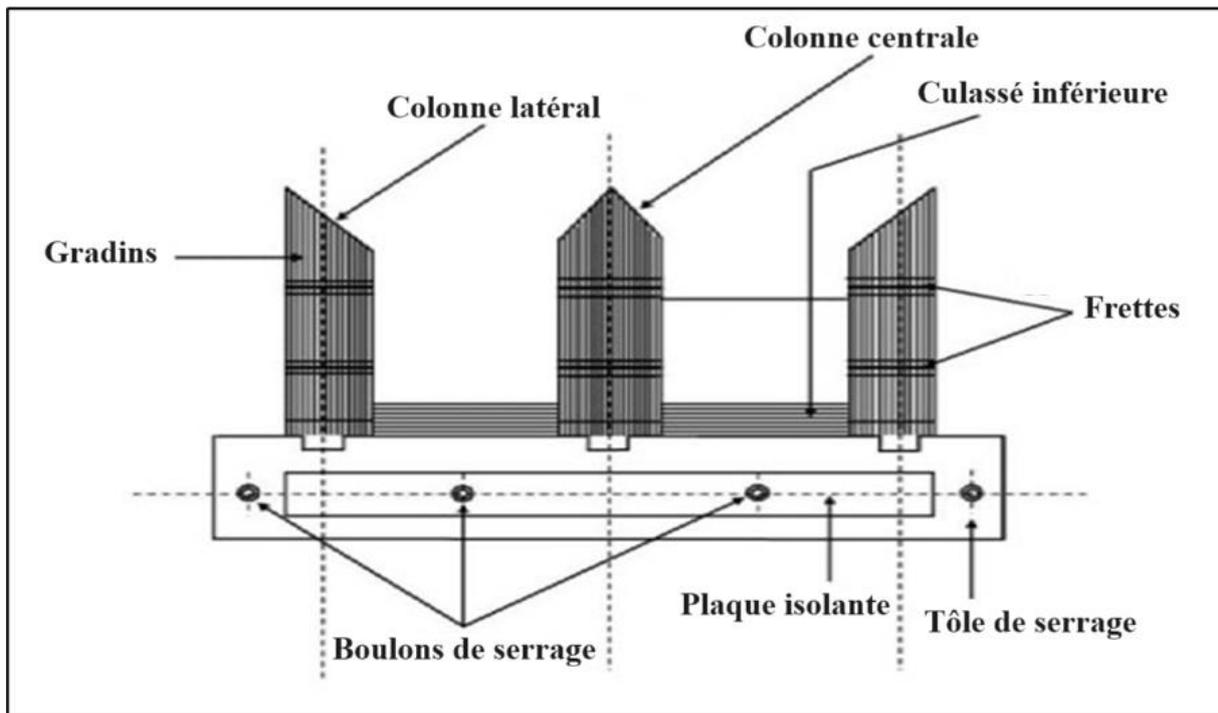


Figure I.1. Circuit magnétique d'un transformateur triphasé.

Pour une meilleure efficacité, la tôle du circuit magnétique doit [2] :

- Être fabriquée en matériau ferromagnétique à haute perméabilité pour une transformation suffisamment efficace de l'énergie électrique.
- Être isolée pour diminuer les courants de Foucault.
- Être à grains orientés pour avoir une perméabilité plus élevée dans la direction du flux.

I.3.1.2 Bobinage (enroulements)

Un transformateur présente deux enroulements, le primaire et le secondaire.

- L'enroulement primaire est la bobine qui reçoit l'énergie. Il est formé, bobiné et façonné autour du noyau de fer.
- L'enroulement secondaire est la bobine qui décharge l'énergie sous une tension transformée ou modifiée.

Le cuivre est le principal matériau utilisé pour les enroulements des transformateurs, souvent isolés avec du papier. Bien qu'il existe des enroulements en aluminium, l'utilisation généralisée du cuivre dans l'industrie électrique est due à sa conductivité et à ses propriétés mécaniques supérieures. Son efficacité dans les transformateurs est cruciale pour gagner de la place et minimiser les pertes de charge par rapport à d'autres métaux [3].

Deux technologies de bobinages des transformateurs sont réalisables [3] : cuirassé ou colonne.

- Cuirassé : dans cette technologie le circuit magnétique entoure le bobinage haut et basse tension d'une phase donnée, comme sur la figure (I.2.1). Les chemins de retour du flux magnétique à travers le circuit magnétique sont externes et entourent les bobinages.
- Colonne : les transformateurs à colonnes ont leurs chemins de retour du flux magnétique qui passent dans des jambes de circuit magnétique qui sont entourées concentriquement par les enroulements principaux, comme sur la figure (I.2.2).

Dans les transformateurs à colonne, plusieurs types des enroulements utilisés, on distingue : les enroulements continus, tressés (entrelacés), en hélice, en disques (galettes) et les enroulements cylindriques [3].

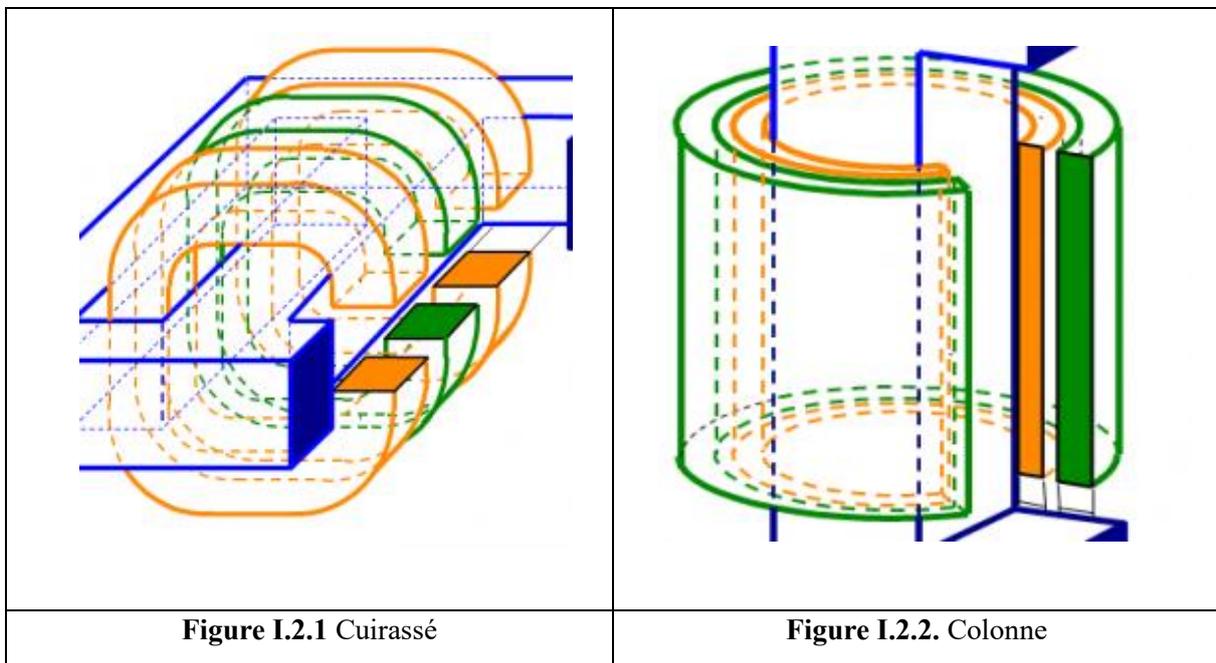


Figure I.2. Technologies de bobinages des transformateurs.

I.3.1.3 Représentation des enroulements

Enroulement primaire (HT)

Le courant traversant la bobine est de faible intensité, mais la tension très élevée à laquelle elle est soumise nécessite une section de conducteur plus petite. L'enroulement comportant le plus grand nombre de spires est celui destiné à la haute tension [4].

Enroulement secondaire (BT)

Le courant traversant cette bobine est de grande intensité. Pour obtenir cette caractéristique, on limite le nombre de spires et on utilise une section des conducteurs relativement importante [4].

I.3.2 Partie constructive

Elle est constituée des éléments suivants (**Figure I.3**) :

La cuve

Elle est destinée à contenir la partie active baignant dans l'huile, et assure le maintien mécanique du circuit magnétique et des enroulements. Dans le fond de la cuve se trouve un dispositif d'écoulement du liquide de refroidissement et d'isolement pour favoriser le refroidissement des bobinages [5].

Le couvercle

Le couvercle est un élément important de la cuve, il présente la partie supérieure du transformateur. Sa fonction principale est d'assurer la fermeture de la cuve, par ailleurs il sert comme un support aux accessoires suivants [2] :

- Les traversées.
- Le relais Buchholz.
- L'indicateur de niveau d'huile.
- Le commutateur de réglage de tension.
- Capteur d'humidité (Silicagel).
- La poche de thermomètre pour la fixation d'un appareil de surveillance de la température.

Les traversées

Les traversées ont pour rôle d'assurer, à travers le couvercle, la liaison électrique entre les extrémités des enroulements d'une part, et les lignes d'arrivées et de départ d'autre part, dont leurs rôles sont [6] :

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

Le conservateur d'huile

Il permet le remplissage de la cuve et réduit la surface de l'huile en contact avec l'air extérieur humide [7].

Les isolateurs (HT)

Ils sont au nombre de trois et ont pour rôle d'assurer la liaison électrique entre les extrémités des enroulements primaire (HT) et les lignes d'arrivées [7].

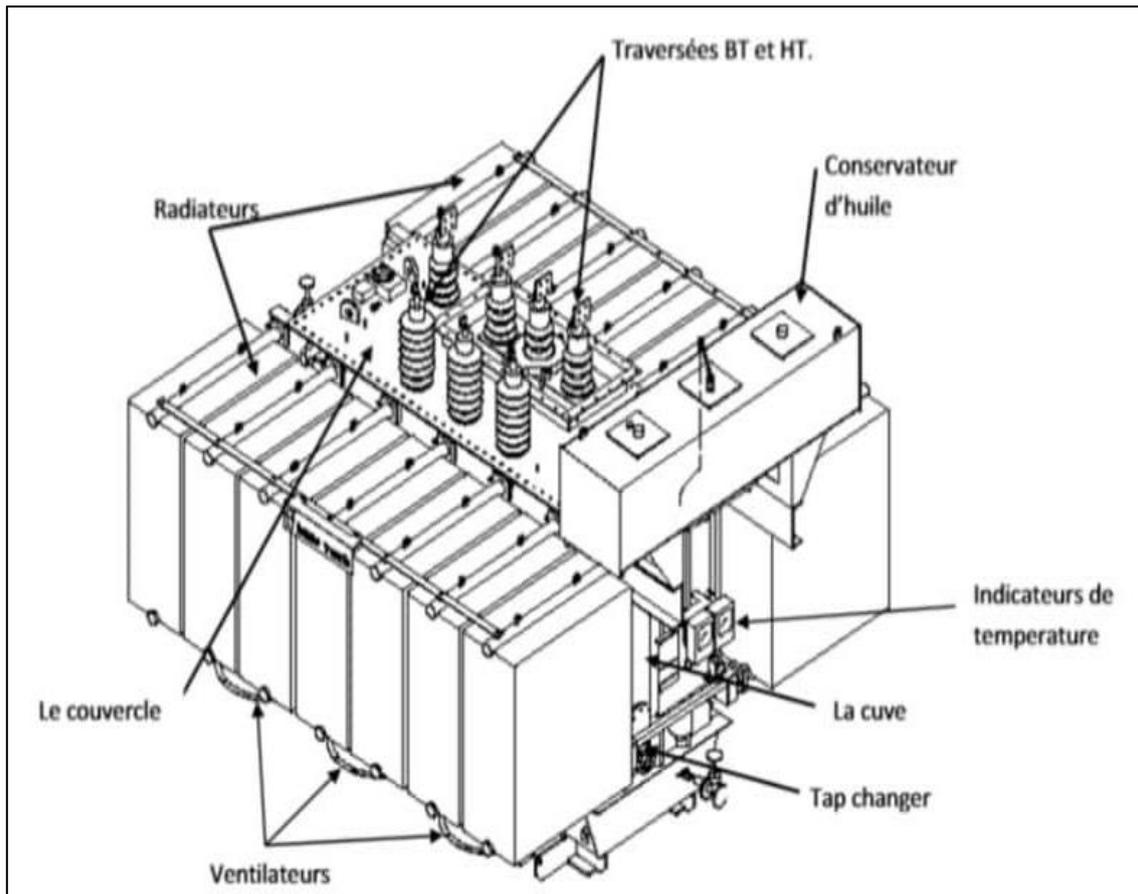


Figure I.3. Partie constructive du transformateur.

I.4 Isolation

Dans la partie active d'un transformateur de puissance on trouve deux types d'isolation.

✚ Isolation cellulosique

Les matériaux isolants solides appliqués tels que le papier, comprimé, le cylindre isolant et le carton sont faits à partir des matériaux cellulosiques qui constituent le meilleur compromis technico-économique de l'isolation du système imprégné dans les transformateurs de puissance [8].

✚ Isolation liquide

L'huile de transformateur, généralement dérivée du pétrole brut, est composée d'alcane, de naphènes et d'hydrocarbures aromatiques. Elle subit des processus de raffinage tels que le traitement acide, l'extraction par solvant et l'hydrotraitement pour répondre à des caractéristiques spécifiques. Ses principales fonctions sont l'isolation diélectrique et le refroidissement des transformateurs. Les versions modernes sont plus stables et sans soufre, ce qui garantit de meilleures performances et une plus grande longévité [8].

I.5 Caractéristiques de transformateur

Le tableau suivant représente les caractéristiques du transformateur.

Tableau I.1. Caractéristiques de transformateur [10].

Puissance électrique	Normes
Nombre de phases	Isolement
Fréquence	Echauffements
Tension primaire HT	Pertes garanties
Tension secondaire MT	Essais spéciaux
Tension secondaire BT	Mode refroidissement
Indice de couplage	Particularités d'installation
Tension de CC (U _{cc}) %	Particularités de transport

Un exemple d'illustration d'une plaque signalétique est indiqué ci-après :

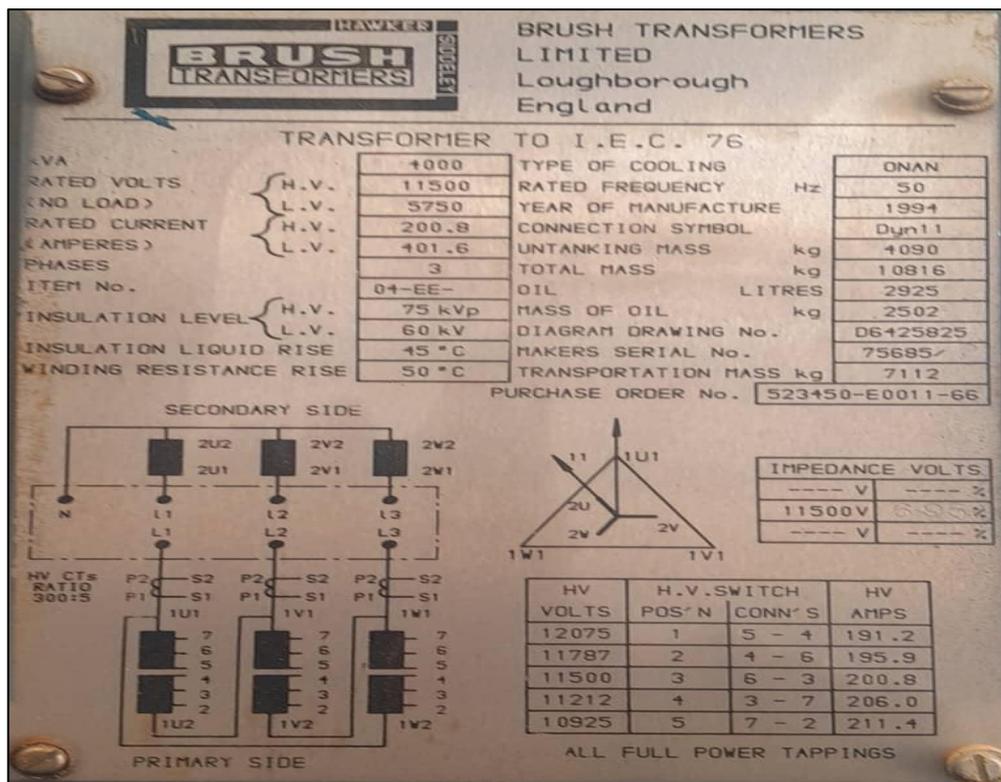


Figure I.4. Plaque signalétique du transformateur de puissance.

I.6 Symboles électriques du transformateur

Le transformateur peut être représenté par l'un des symboles reportés sur les figures (I.5) et (I.6) [4].

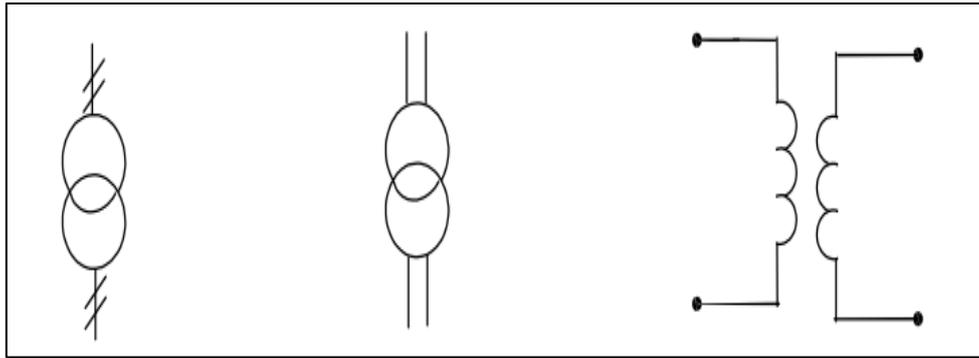


Figure I.5. Symboles électriques du transformateur monophasé.

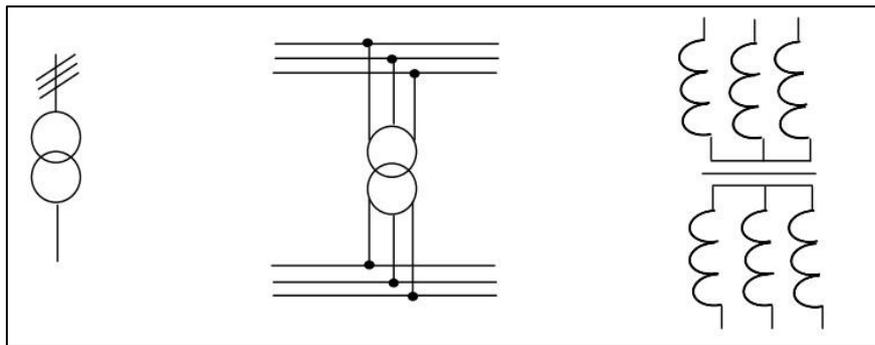


Figure I.6. Symboles du transformateur triphasé.

I.7 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 [5].

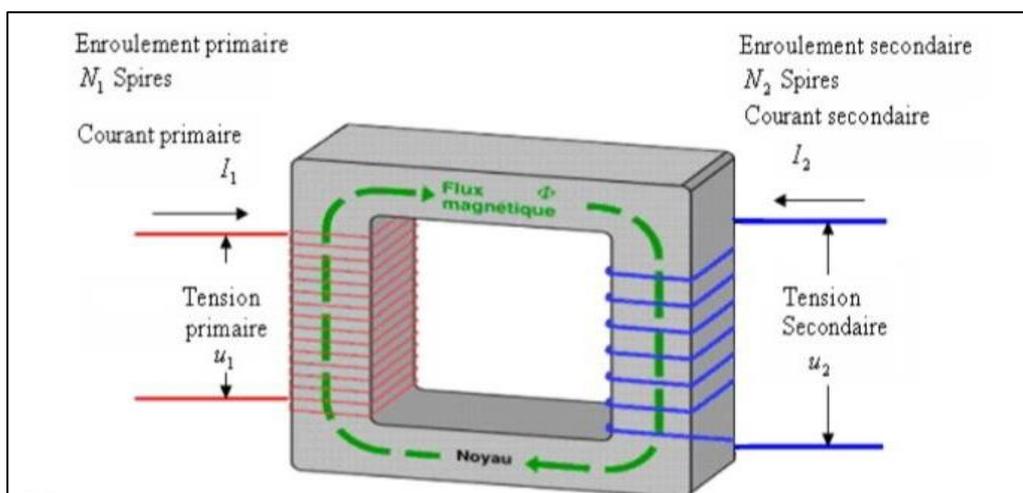


Figure I.7. Noyau magnétique.

Il est important de noter que le transformateur ne peut pas fonctionner en régime de tension continue puis que les forces électromotrices dans les bobinages sont induites par les variations de flux. De plus, le transformateur est réversible ; chaque bobinage peut jouer le rôle du primaire ou Secondaire [5].

I.8 Type des transformateurs

I.8.1 Transformateur de puissance

Les transformateurs de puissance, sont utilisés dans les réseaux de transmission pour gérer des tensions plus élevées, ont généralement des valeurs nominales de 400 KV, 200 KV, 110 KV, 66 KV et 33 KV. Leur puissance nominale est principalement supérieure à 200 MVA et on les trouve couramment dans les centrales électriques et les sous-stations de transmission. Ces transformateurs sont conçus pour un rendement maximal, et sont plus grands que les transformateurs de distribution [9].

À des tensions extrêmement élevées, la distribution directe de l'électricité aux consommateurs n'est pas possible, de sorte que le courant est ajusté au niveau requis à l'aide de transformateurs d'alimentation abaisseurs de tension. Ces transformateurs fonctionnent en dessous de leur pleine capacité, ce qui entraîne des pertes de cœur qui varient en fonction du cycle de charge du réseau de distribution. Lorsque les transformateurs d'alimentation sont reliés au réseau de transport, les fluctuations de charge sont minimales puisqu'ils ne sont pas directement connectés aux consommateurs. En revanche, lorsqu'ils sont reliés au réseau de distribution, des fluctuations de charge se produisent [9].

Le transformateur fonctionne en continu pendant 24 heures, subissant des pertes de noyau et de cuivre tout au long de la journée. Les transformateurs de puissance sont plus économiques lorsque l'énergie est produite à des niveaux de tension faibles. Des niveaux de tension plus élevés entraînent une réduction du courant du transformateur, ce qui augmente les pertes I^2R et la régulation de la tension [9].



Figure I.8. Transformateur de puissance.

I.8.2 Transformateur d'instrumentation

Un transformateur d'isolement, communément appelé transformateur d'instrument, est un dispositif électrique utilisé pour ajuster les niveaux de courant et de tension, sa fonction première est de protéger l'enroulement secondaire de la haute tension et du courant dans le primaire, garantissant que les instruments de mesure, les compteurs d'énergie ou les relais connectés ne sont pas endommagés [9].

I.8.3 Transformateur monophasé

Un transformateur monophasé est un appareil statique qui fonctionne selon la loi de Faraday sur l'induction mutuelle. Il transfère le courant alternatif entre les circuits à une fréquence et à un niveau de tension constants. Le transformateur comprend deux types d'enroulements : l'enroulement primaire, où le courant alternatif est introduit, et l'enroulement secondaire, qui se connecte à la charge [9].

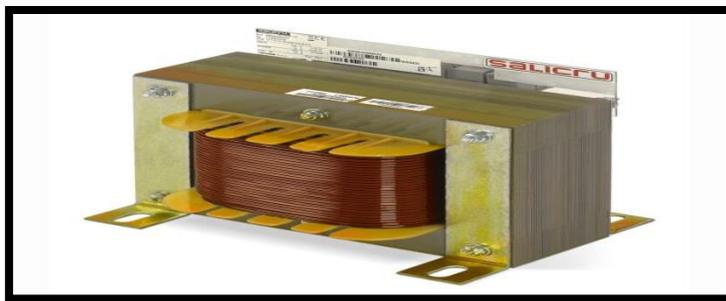


Figure I.9 Transformateur monophasé.

I.8.4 Transformateur de courant

Le transformateur de courant est utilisé à la fois pour la mesure et la protection. Lorsque le courant dans le circuit est trop élevé pour être appliqué directement à l'instrument de mesure, le transformateur de courant est utilisé pour convertir ce courant élevé en une valeur appropriée pour le circuit de mesure [7].

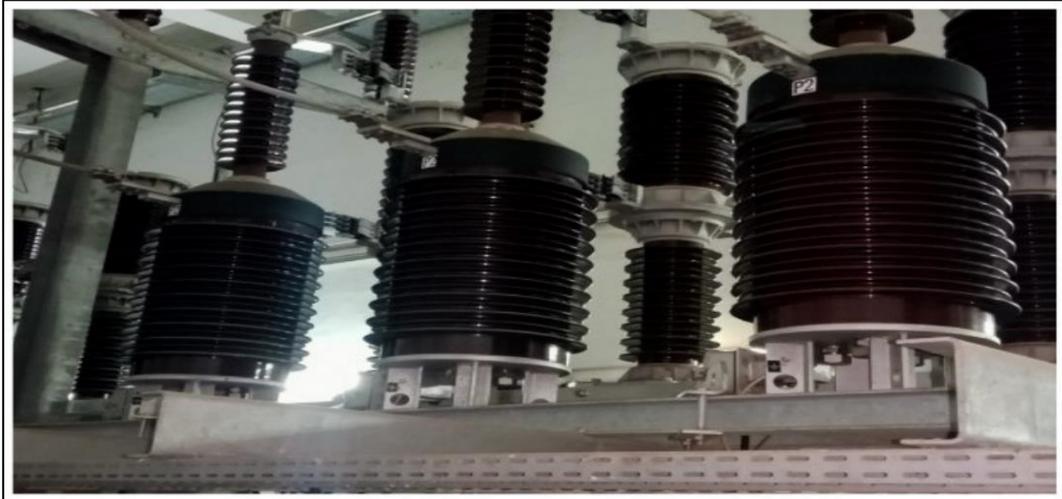


Figure I.10. Transformateurs de courant.

I.8.5 Transformateur de potentiel

Le transformateur de potentiel, également appelé transformateur de tension, relie son enroulement primaire à la ligne à haute tension à mesurer, tandis que les instruments et les compteurs sont reliés à son côté secondaire, son but premier est de réduire la tension à un niveau sûr, l'enroulement primaire étant généralement mis à la terre pour des raisons de sécurité [9].

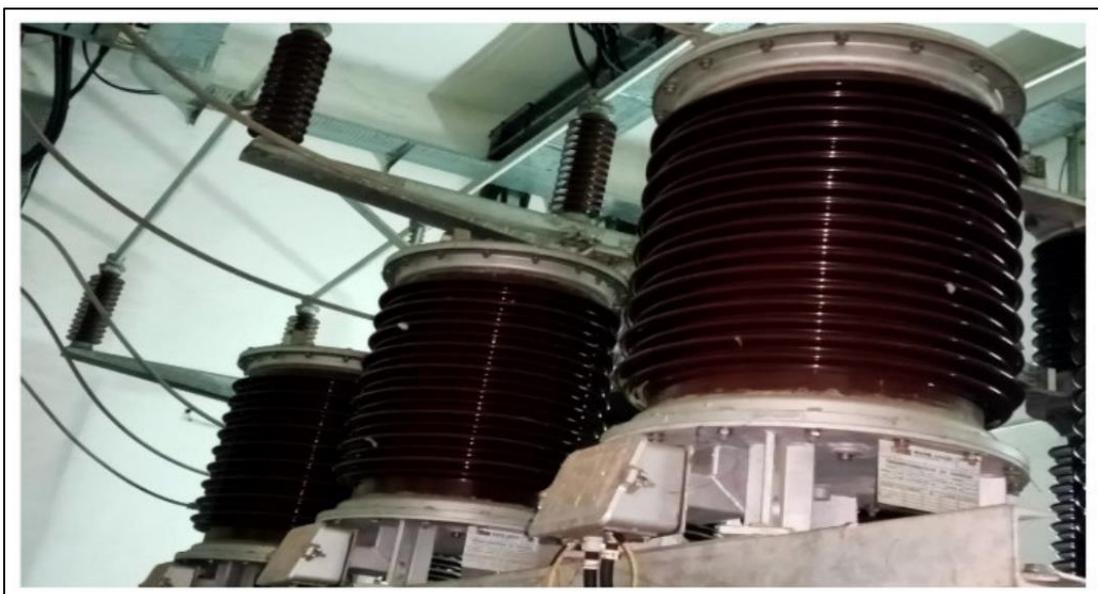


Figure I.11. Transformateurs de tension.

I.8.6 Transformateur triphasé

Le transformateur triphasé est un appareil statique à induction électromagnétique destinée à transformer un système triphasé et alternatif en un autre système triphasé et alternatif de même fréquence, d'intensités et de tensions généralement différents, en assurant un isolement galvanique [7].

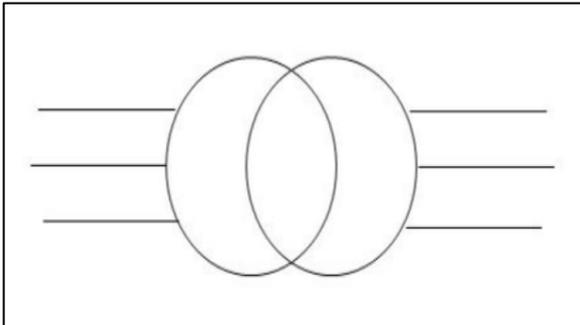


Figure I.12. Symbole du transformateur triphasé.

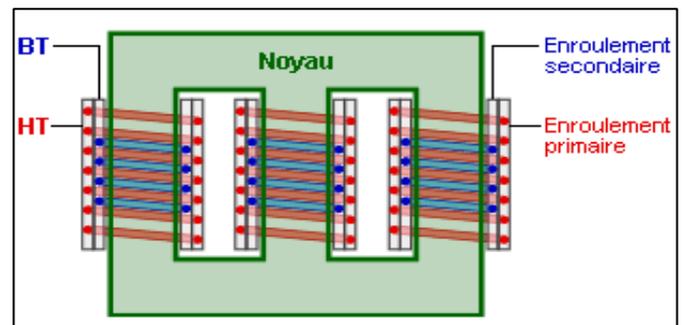


Figure I.13. Transformateur triphasé.

🚦 Couplage de Transformateur triphasé

Afin de caractériser d'une manière conventionnelle les couplages des transformateurs triphasés, on désigne la nature des couplages par des lettres désignant, en majuscule le primaire, et en minuscule le secondaire.

Les enroulements primaires ou secondaires peuvent être couplés en étoile, en triangle ou en zig-zag.

L'association d'un mode de connexion du primaire avec un mode de connexion du secondaire caractérise un couplage du transformateur (Yz par exemple).

🚦 Notation [22]

- Y ou y : couplage étoile primaire ou respectivement couplage étoile secondaire.
- D ou d : couplage triangle primaire ou respectivement couplage triangle secondaire.
- Z ou z : couplage zig-zag primaire ou respectivement couplage zig-zag secondaire.

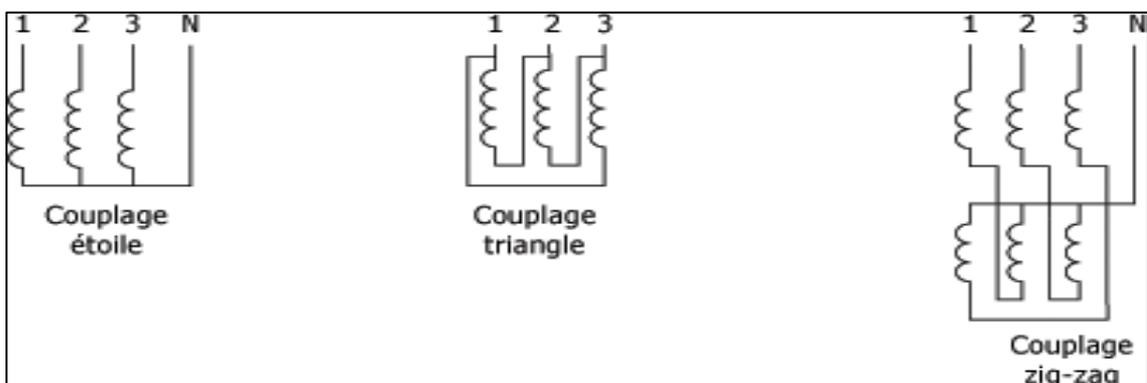


Figure I.14. Couplage de transformateur triphasé.

✚ Rapport de transformation

Le rapport de transformation qui relie les grandeurs analogues du primaire et du secondaire ne dépend plus uniquement des nombres de spires mais aussi du mode de couplage des enroulements. Dès lors qu'on parle d'un transformateur triphasé, on se doit donc d'en préciser les différents couplages [23].

✚ Rapport de transformation par colonne mc

Il est défini comme étant le rapport de nombre de spires secondaire par le primaire :

$$m_c = \frac{N_2}{N_1} \quad (\text{I.1})$$

Et il est égal au rapport de deux tensions homologues.

✚ Rapport de transformation par phase m

C'est le rapport entre deux tensions de même nature (simple ou composée) [23].

$$m = \frac{V_{a0}}{V_A} = \frac{U_{ab0}}{U_{AB}} \quad (\text{I.2})$$

✚ Indice horaire

Les conditions de couplage des enroulements primaires et secondaires ont aussi pour effet d'introduire un déphasage entre des tensions primaires et secondaires et homologues, c'est à dire apparaissant entre les bornes désignées par des mêmes lettres (V_A , V_a) ou (U_{AB} , U_{ab}) [24].

En pratique, le déphasage θ obtenu est toujours un multiple entier de 30° .

θ = retard d'une tension BT sur son homologue HT.

L'indice horaire I est : $I = \theta / 30^\circ$ $0 \leq I \leq 11$ (entier).

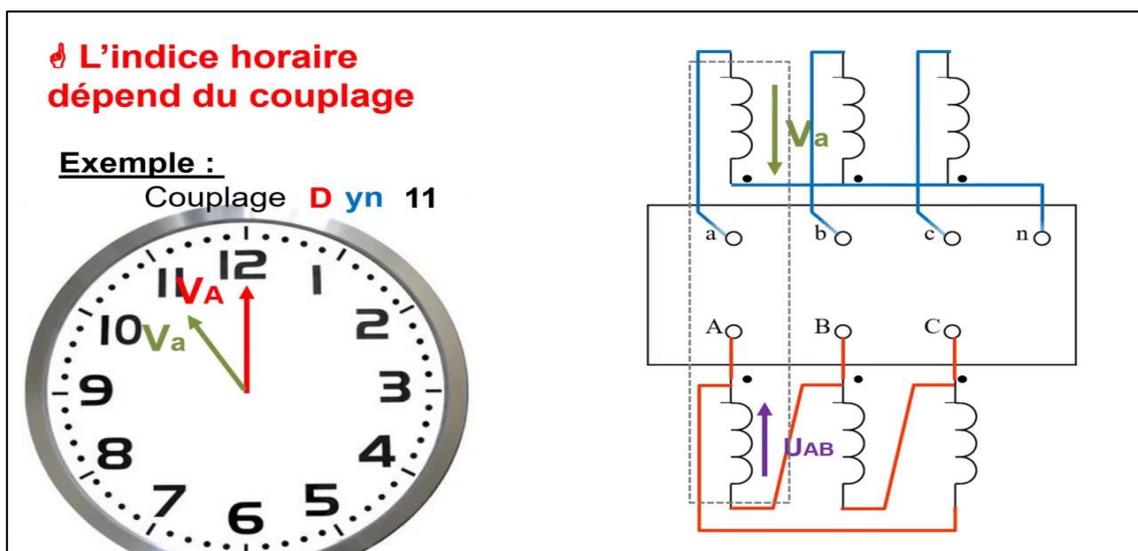


Figure I.15. Indice horaire.

I.9 Échauffement et refroidissement des transformateurs

I.9.1 Echauffement

L'échauffement des transformateurs est un phénomène naturel et inévitable lors de leur fonctionnement. Il est causé par les pertes d'énergie qui se produisent dans le noyau et les enroulements du transformateur. Ces pertes se transforment en chaleur, augmentant de la température du transformateur.

Les causes de l'échauffement des transformateurs sont [14] :

- Perte de fer.
- Perte par effet joule (pertes cuivre).
- Perte diélectrique.
- Mauvais refroidissement.
- Surcharge.
- Température ambiante élevée.

Cet échauffement engendre avec lui les effets suivants [2] :

- Pertes d'énergie.
- Action de chaleur sur les métaux.
- Action sur les isolants et vernis.

I.9.2 Refroidissement

Pour éviter la surchauffe des isolants, il est essentiel de refroidir les transformateurs de haute puissance. Ce refroidissement peut être réalisé selon diverses méthodes suivantes [5] :

Refroidissement dans l'air

Le transformateur est mis dans une enceinte grillagée, la ventilation peut être naturelle ou forcée.

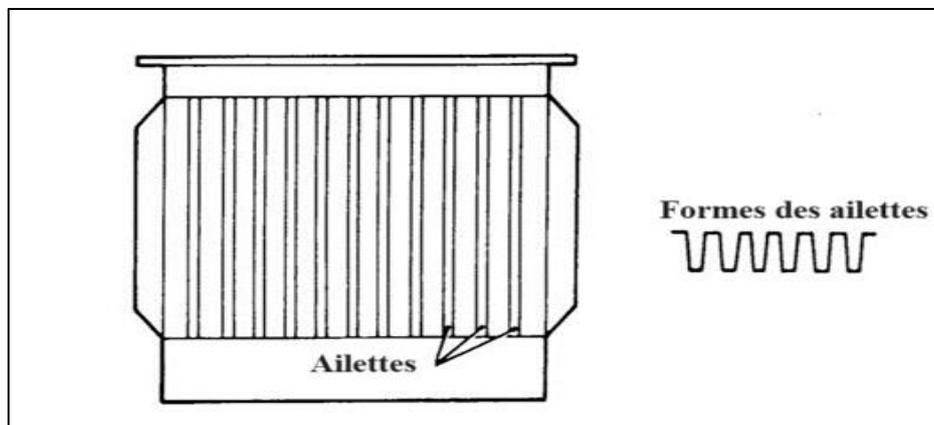


Figure I.16. Enceinte grillagée de transformateur.

✚ 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) [5].

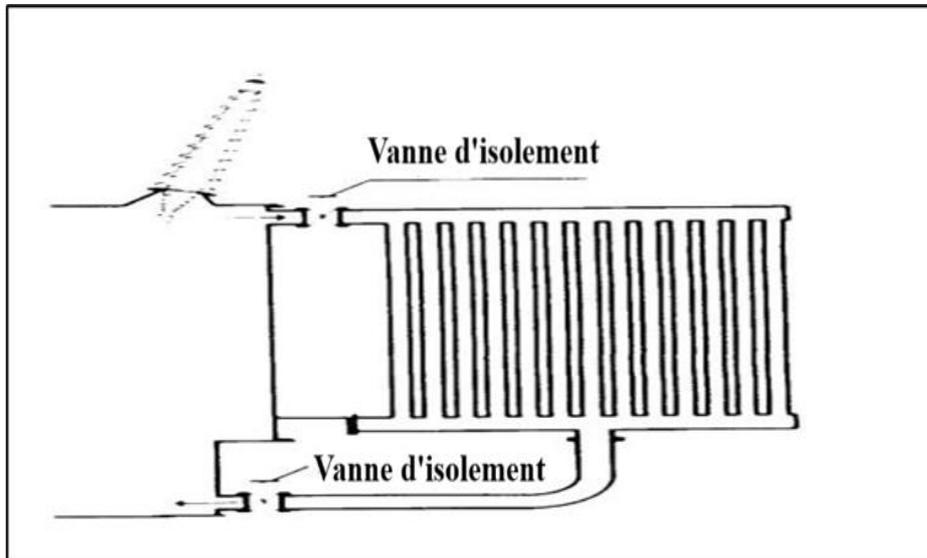


Figure I.17. Cuve du transformateur.

✚ 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 [5].

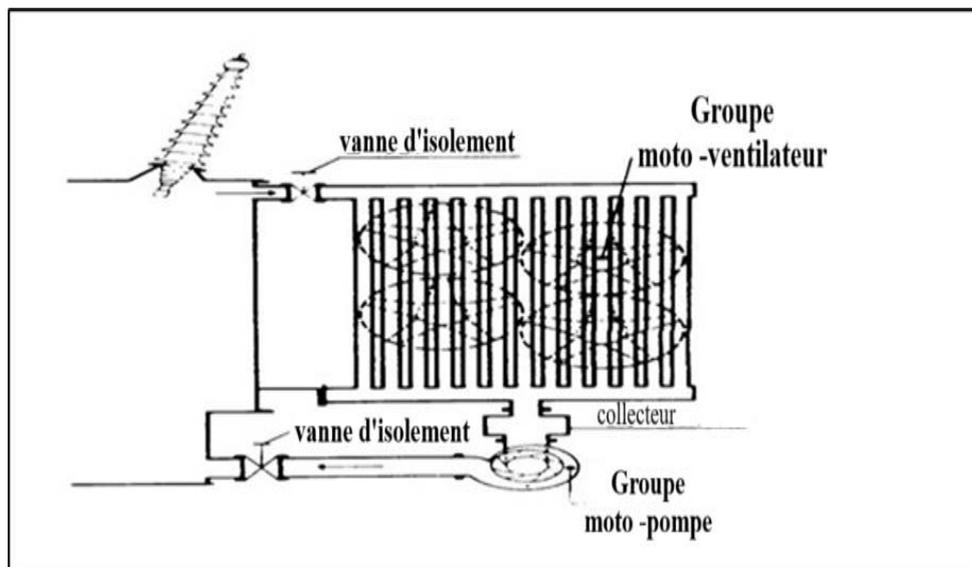


Figure I.18. Radiateur du transformateur.

✚ Refroidissement avec hydro réfrigérant

La circulation de l'huile s'effectue dans une cuve contenant des tubes à l'intérieur desquels circule de l'eau froide [5].

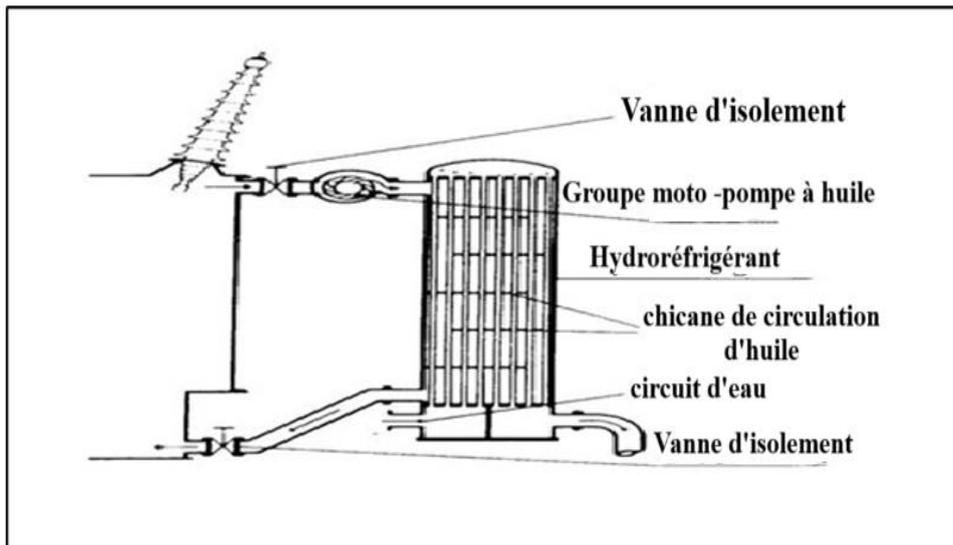


Figure I.19. Cuve contenant des tubes.

I.9.3 Modes de Refroidissement

Le mode de refroidissement est désigné par le constructeur à l'aide de quatre lettres. Le tableau suivant montre la signification de ces symboles :

Tableau I.2. Signification de symbole [15].

1ère lettre	2ème lettre	3ème lettre	4ème lettre
Nature du diélectrique	Mode de circulation Diélectrique	Fluide du Refroidissement	Mode de circulation Fluide
O huile minérale	N naturel	O symbole comme 1ère Lettre	N symbole Comme 2ème lettre
L diélectrique Chloré	F forcée	L	F
G gaz	D forcée et dirigée dans les enroulements	G	D
A air		A	
S isolant Solide		S	

Les différents modes de refroidissement de l'huile sont :

🚦 ONAN: (Oil Natural-Air Natural)

Le système ONAN consiste à dissiper la chaleur de l'huile dans l'atmosphère par la circulation naturelle de l'huile à travers les enroulements et l'équipement de refroidissement. Lorsque les parties actives du transformateur chauffent, la température de l'huile augmente, ce qui réduit sa

densité et la fait monter vers l'entrée des refroidisseurs. En passant par les échangeurs de chaleur ou les refroidisseurs, la densité de l'huile augmente, ce qui lui permet de redescendre. Voir la **figure (I.20) [16]**.

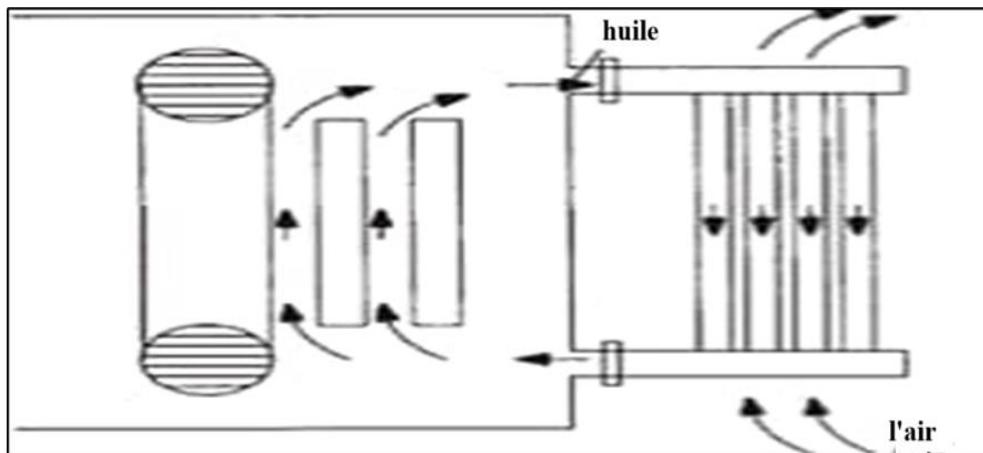


Figure I.20. ONAN.

✚ ONAF: (Oil Natural-Air Force)

Le système de refroidissement de l'ONAF maintient la circulation de l'huile dans les enroulements et l'échangeur de chaleur, mais utilise maintenant de l'air forcé sur les radiateurs. Lorsque la charge augmente, le refroidissement naturel ne suffit pas à dissiper la chaleur au rythme requis. L'utilisation de ventilateurs améliore le transfert de chaleur, augmentant ainsi la capacité du transformateur. Avec un étage de ventilateurs, la capacité peut atteindre jusqu'à 133 % de la valeur nominale de base, et avec deux étages, jusqu'à 167 % [16].

✚ OFAF: (Oil Force-Air Force)

Le refroidissement OFAF améliore le transfert de chaleur en utilisant des pompes pour faire circuler l'huile, pour optimiser la dissipation de la chaleur avec le refroidissement OFAF, il est essentiel que les ventilateurs soufflent constamment de l'air sur les radiateurs. Voir la **figure (I.21) [16]**.

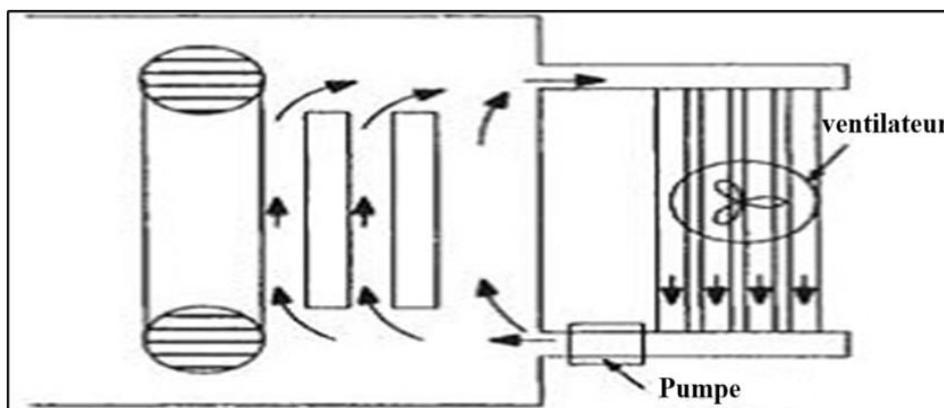


Figure I.21. OFAF.

✚ ODAF: (Oil Directed- Air Force)

L'amélioration de la dissipation de la chaleur peut être obtenue plus efficacement en dirigeant le flux d'huile à travers les enroulements, comme le montre la **figure (I.22)**. Lorsque l'huile circule dans les enroulements sous pression, on parle d'écoulement dirigé (ODAF), alors que l'écoulement libre de l'huile à l'intérieur du réservoir est appelé écoulement non dirigé, Voir **figure (I.21) [16]**.

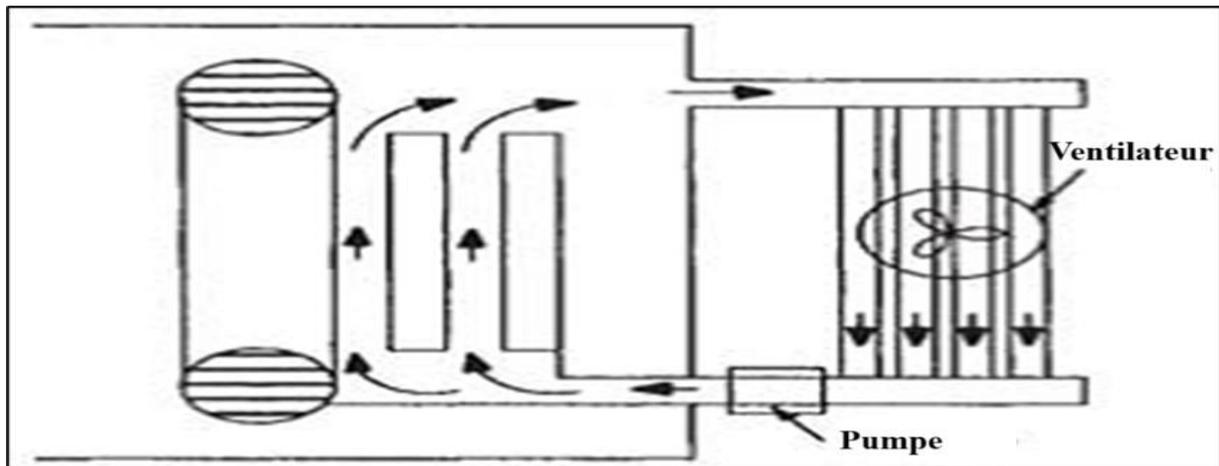


Figure I.22. ODAF.

I.10 Protection des transformateurs

Le transformateur est un élément particulièrement important d'un réseau électrique.

Il est nécessaire de le protéger efficacement contre tous les défauts susceptibles de l'endommager qu'ils soient internes ou externes [8].

I.10.1 Protections internes

I.10.1.1 Relais BUCHHOLZ

Le relais Buchholz est installé sur tous les transformateurs de puissance immergés dans l'huile entre le haut de la cuve et le conservateur. Tout accident interne important se traduit par [17] :

- Un dégagement de gaz, qui fait descendre un flotteur et active une alarme (1^{er} stade).
- Un mouvement d'huile important en partie supérieure de la cuve, où se place le relais, qui fait basculer un flotteur et provoque le déclenchement du transformateur (2^{ème} stade).



Figure I.23. Relais Buchholz.

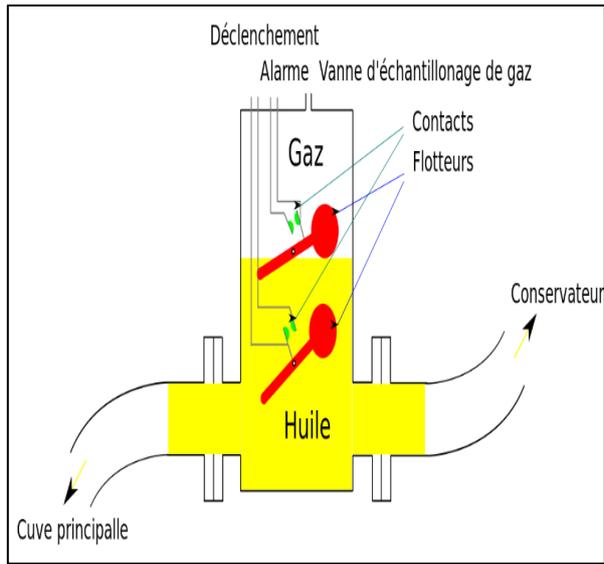


Figure I.24. Schéma d'un relais Buchholz.

I.10.1.2 Protection masse cuve

La cuve est isolée du sol par des plaques isolantes au niveau de ses galets, et est mise en un unique point à la terre. Si un courant de défaut passe du circuit électrique (enroulement, connexion) à la masse à l'intérieur du transformateur, celui-ci sera drainé inévitablement par cette connexion unique de mise à la masse de la cuve. Sur celle-ci se trouve alors un transformateur de courant, appelé couramment « TI masse-cuve » qui au-delà d'une certaine valeur de courant, de défaut donc, déclenche alors le transformateur [3].

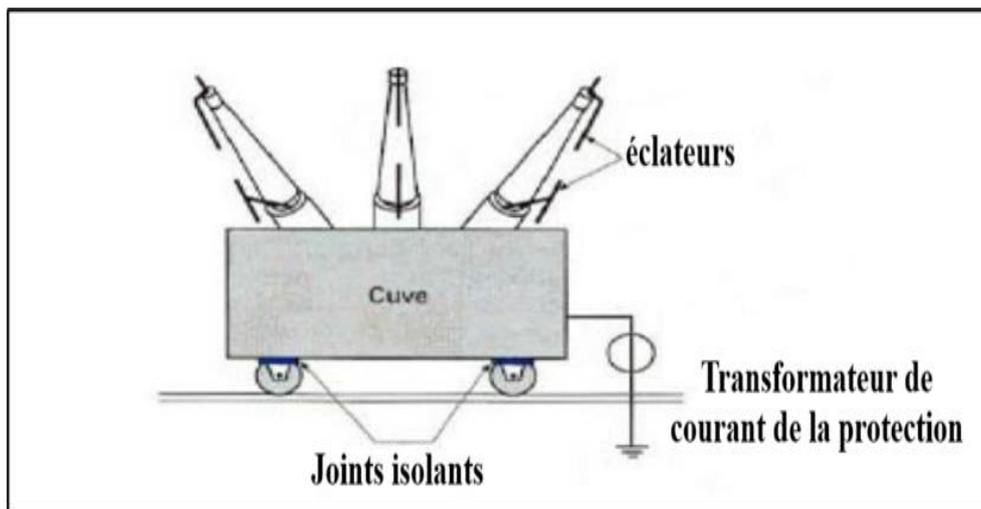


Figure I.25. Protection de masse cuve.

I.10.1.3 Protection par DGPT

Le DGPT (Déflecteur Gaz, Pression et Température) est un dispositif de protection utilisé pour le transformateur isolement liquide. Ce dispositif détecte les anomalies au sein du diélectrique

liquide telles qu'émission de gaz, élévation de pression ou de température, et provoque la mise hors tension du transformateur [18].

Il est principalement destiné à la protection des transformateurs immergés étanches à remplissage total. Pour un défaut grave, le dégagement gazeux est recueilli en un point haut au relais, une accumulation trop importante provoque une alarme [18].

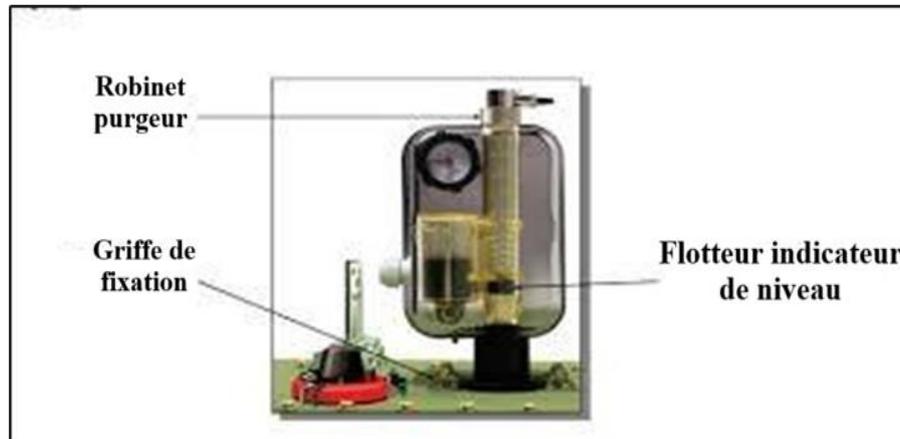


Figure I.26. DGPT.

I.10.1.4 Protection thermique (thermostat)

Il surveille la température de l'huile. Une fois qu'elle atteint (80°C), il va déclencher la commande automatique des ventilateurs pour le refroidissement [19].

- **Les indicateurs de température :** Il est équipé de deux indicateurs de température.
- **Les indicateurs de température de l'huile :** Il sert à surveiller l'échauffement de l'huile dans la cuve. Pour une température de l'huile qui atteint 90°C il donne l'alarme, et pour 100°C on aura un déclenchement.

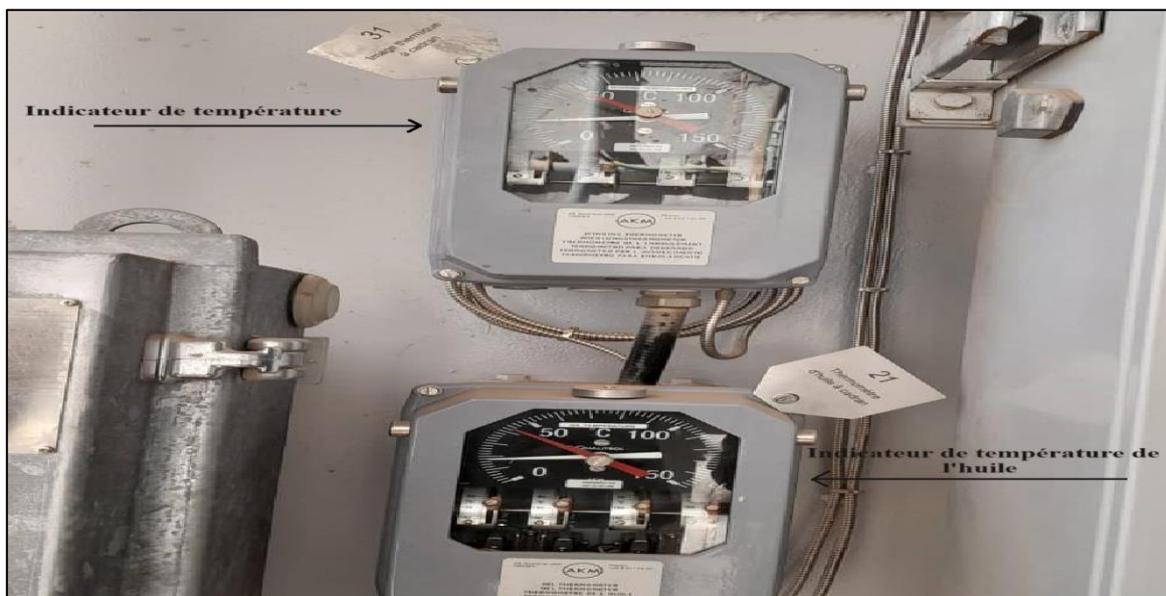


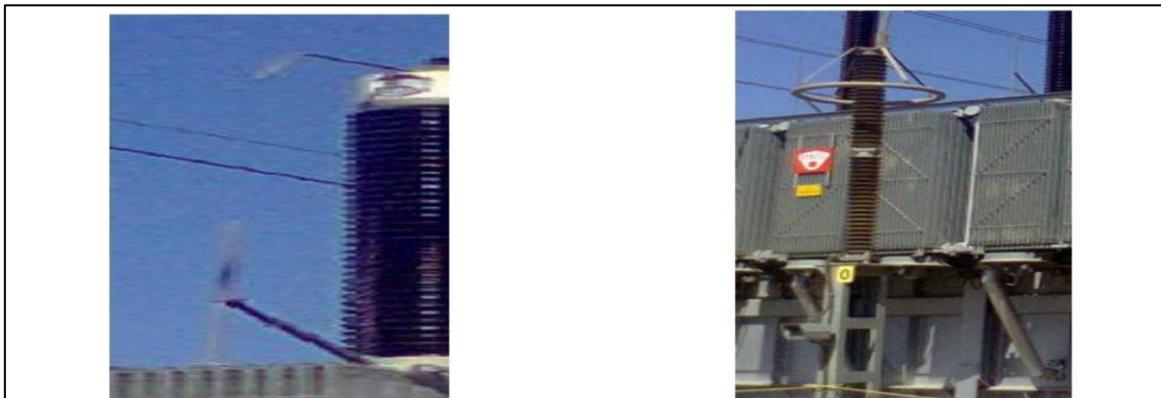
Figure I.27. Indicateurs de température et indicateurs de température de l'huile.

I.10.2 Protections externes

I.10.2.1 Protection surtension

Deux moyens de protection contre les surtensions sont utilisés de manière large, les éclateurs et les parafoudres [8] :

- **Eclateur** : est un dispositif simple constitué de deux électrodes dans l'air. La limitation de tension aux bornes est effectuée par l'amorçage d'intervalle d'air.
- **Parafoudre** : permettent de se débarrasser de ce comportement néfaste car ils présentent un comportement réversible. Ce sont des résistances fortement non linéaires qui présentent une diminution importante de leur résistance interne au-dessus d'une certaine valeur de tension aux bornes.



Eclateur.

Parafoudre.

Figure I.28. Eclateur et Parafoudre.

I.10.2.2 Protection différentielle

La protection différentielle est obtenue par la comparaison de la somme des courants primaires à la somme des courants secondaires. L'écart de ces courants ne doit pas dépasser une valeur i_0 pendant un temps supérieur à t_0 , au-delà il y a déclenchement.

La protection différentielle transformateur est une protection principale aussi importante que les protections internes transformateur. Cette protection à une sélectivité absolue, il lui est demandé, en plus, d'être très stable vis-à-vis des défauts extérieurs.

Le principe de fonctionnement de la protection est basé sur la comparaison des courants entrants et des courants sortants du transformateur. [20]

Cette protection s'utilise [20] :

- Pour détecter des courants de défaut inférieurs au courant nominal.
- Pour déclencher instantanément puisque la sélectivité est basée sur la détection et non sur la temporisation.

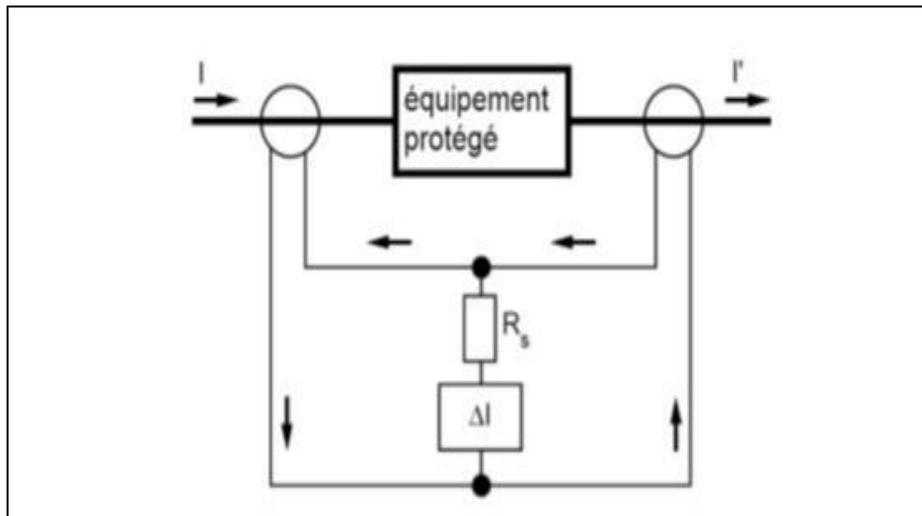


Figure I.29. Schéma de protection différentielle à haute impédance.

I.10.2.3 Protection contre les courts-circuits et les surcharges

Si le dispositif doit être utilisé comme protection contre les courts-circuits, le fusible ou le disjoncteur doit interrompre rapidement le défaut (généralement en moins de 4 millisecondes) afin de fournir le maximum de protection à l'équipement et au personnel.

Si le fusible ou le disjoncteur est seulement destiné à la protection contre les surcharges, il peut alors être beaucoup plus lent à réagir à la surintensité : quelques secondes, voire quelques minutes plutôt que des millisecondes... [21]



Figure I.30. Fusibles et Disjoncteur.

I.10.2.4 Cellule de protection

C'est la cellule de protection et de commande automatique du transformateur, elle est composée de deux parties essentielles : le SEPAM et le disjoncteur, elle a aussi des accessoires (les fils de connexions, les borniers, une lampe, une résistance chauffante ...) [19].

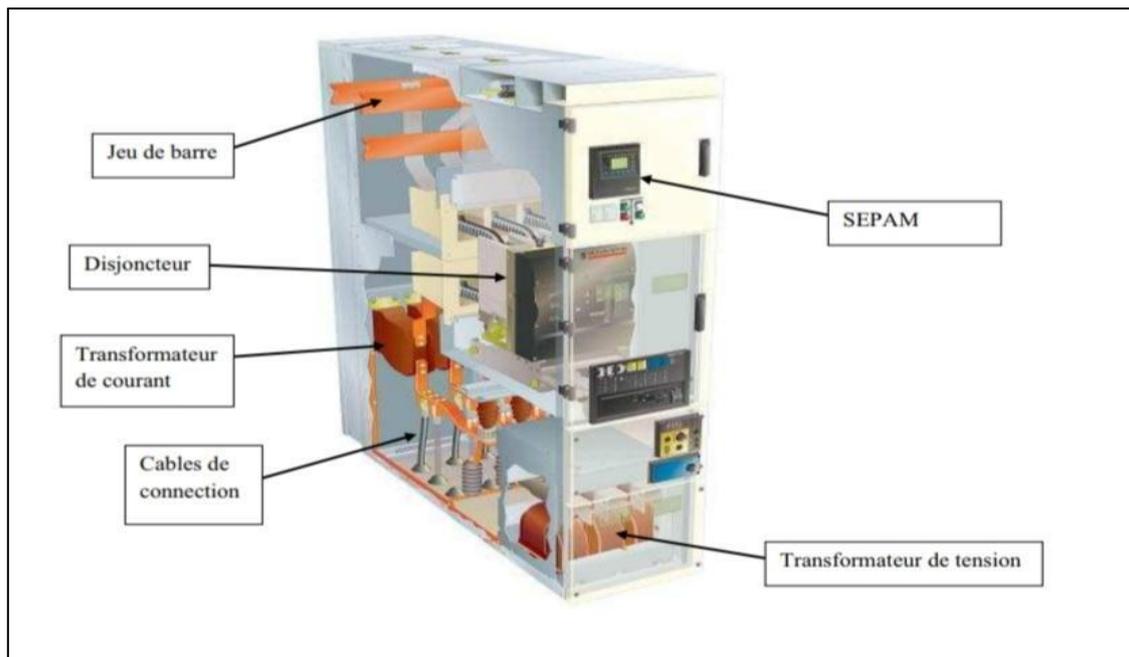


Figure I.31. Cellule de protection.

▪ Relais de protection (SEPAM)

Il est conçu pour gérer les machines et les réseaux électriques dans les environnements industriels et les sous-stations de distribution d'énergie à différents niveaux de tension, en fournissant des solutions intelligentes sur mesure.

Le SEPAM est un relais numérique avancé qui privilégie la convivialité en intégrant l'automatisation de la sélection des transmissions d'informations vers le superviseur et les protections liées [19].



Figure I.32. Relais de protection SEPAM.

Il se compose de solutions complètes, simples et fiables, adaptées aux applications suivantes [19] :

- Protection des sous-stations (arrivées et départs).
- Protection des transformateurs.
- Protection des moteurs.
- Protection des jeux de barres.

I.11 Conclusion

Enfin, nous avons parlé des deux parties fondamentales des transformateurs (La partie active et constructive) et du principe de fonctionnement des transformateurs en général, des méthodes par lesquelles ils sont protégés et des méthodes de refroidissement des transformateurs en cas de chauffage.

Dans le deuxième chapitre, nous concentrerons sur la transformation thermique, ses types et son impact sur les transformateurs triphasés, ainsi que sur les différentes pertes qui peuvent survenir lors de l'utilisation d'un transformateur électrique.

CHAPITRE II : TRANSFERT THERMIQUE

II.1 Introduction

Le transformateur est un équipement électrique essentiel du système d'alimentation, son bon fonctionnement conditionne directement la sécurité, la stabilité et la fiabilité de l'alimentation électrique. La température ou le niveau de chauffage du transformateur est le paramètre technique crucial pour évaluer son état de fonctionnement.

Le transfert de chaleur est un processus naturel et microscopique qui se produit entre des points de matière ou entre des systèmes à différentes températures. La chaleur passe automatiquement de la zone la plus chaude à la plus froide. La différence de température agit comme le moteur de ce transport, qui, en général, se compose par trois modes : la conduction, la convection et le rayonnement.

Dans ce chapitre, nous parlerons du processus de transfert thermique dans les transformateurs, de ses méthodes, des différentes grandeurs thermiques, ainsi que des différentes pertes thermiques dans les transformateurs triphasés.

II.2 Définition

Un transfert thermique est le transfert d'énergie thermique d'un système à une autre, il se transmet spontanément de celui qui a la température la plus élevée à celui qui a la température la moins élevée. C'est un transfert d'énergie irréversible [25].

II.3 Problèmes thermiques dans un transformateur

Dans les transformateurs, les pertes génèrent de la chaleur, qui est ensuite dispersée par conduction, radiation et convection. La température du point le plus chaud détermine la limite de puissance du transformateur. Ainsi, une connaissance précise des températures à l'intérieur du transformateur, notamment au point le plus chaud des enroulements, permet d'évaluer de gérer de manière fiable les risques de surchauffe par la mise en place de systèmes de refroidissement.

Chaque fabricant a mis au point des techniques de calcul théoriques et empiriques pour déterminer les températures moyennes de l'huile et du cuivre pour une technologie donnée, ainsi que pour évaluer le point de température le plus élevé à l'intérieur des enroulements.

L'amélioration de l'efficacité thermique des transformateurs de grande puissance repose sur une circulation adéquate de l'huile dans le circuit magnétique et les enroulements, une tâche que les fabricants ont depuis longtemps affinée à l'aide de techniques éprouvées [34].

- Canaux de refroidissement des bobinages.

- Circulation forcée pour améliorer les échanges thermiques entre les bobinages et l'huile.
- Circulation zigzag de l'huile en ONAN (pour les transformateurs de type colonne avec enroulements en galettes) ...etc.

II.4 Modes de transfert thermique

Il existe les trois modes de transfert thermique :

- Par conduction.
- Par convection.
- Par rayonnement.

II.4.1 Conduction

La conduction correspond au transfert de chaleur direct entre des matières en contact. La conduction thermique est un terme spécifique aux solides. C'est un transfert thermique direct au sein d'un milieu matériel (par propagation de proche en proche).

La conduction thermique dans le cas d'un matériau isotrope et homogène est décrite par la loi de Fourier. Cette loi affirme que la densité de flux de chaleur φ est proportionnelle à la variation de température. La **Figure II.1** présente l'exemple d'un transfert de chaleur unidirectionnel dans un solide, entre deux faces de températures différentes T_1 et T_2 tel que $T_1 > T_2$. Le sens du transfert thermique se fait toujours de la température chaude vers la température froide. Cette propriété se traduit par un signe moins dans l'expression de la loi de Fourier [26. 27].

$$\varphi = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

- λ : Conductivité thermique du matériau en $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$.
- φ : Densité de flux de la chaleur $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$.
- T : Température [K].

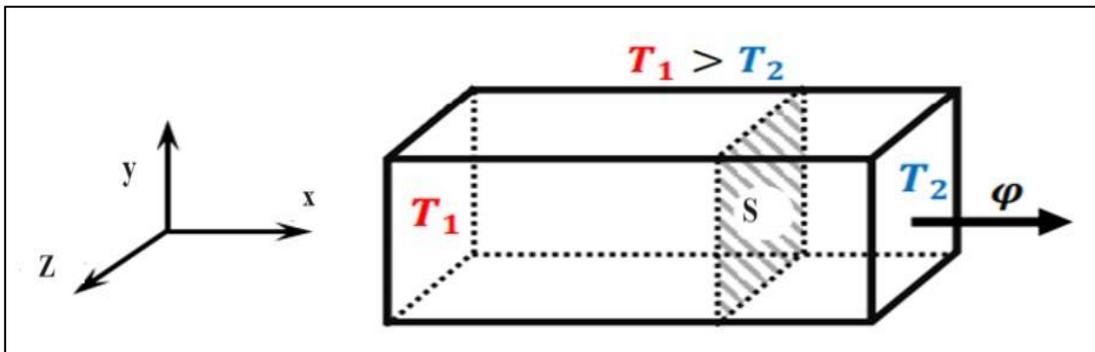


Figure II.1. Conduction thermique dans un solide sous une différence de température.

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

$$\boldsymbol{\varphi} = -\lambda \boldsymbol{grad} T \quad (\text{II.2})$$

II.4.2 Convection

La convection est un mouvement dans un gaz ou un liquide qui est causé par des différences de température. Ce mouvement transfère la chaleur dans le gaz et le liquide. Les molécules des liquides et des gaz sont plus éloignées les unes des autres et ont plus de place pour se déplacer que celles des solides. De ce fait, les molécules de liquide ou de gaz chauffées peuvent se déplacer physiquement. C'est différent de la conduction, où les molécules vibrent simplement plus rapidement [28].

Un échange convectif est décrit par trois équations fondamentales, connues sous le nom d'équations de Navier-Stokes [27].

- Équation de continuité

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (\text{II.3})$$

- Équation de bilan de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \otimes \vec{v}) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{f} \quad (\text{II.4})$$

- Équation de bilan de l'énergie

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [(\rho e + p)\vec{v}] = \vec{\nabla} \cdot (\vec{\tau} \cdot \vec{v}) + \rho \vec{f} \cdot \vec{v} - \vec{\nabla} \cdot \vec{q} + r \quad (\text{II.5})$$

La résolution analytique de ce système de trois équations n'est réalisable que dans des situations spécifiques, nécessitant plusieurs hypothèses et simplifications. Compte tenu de la complexité de cette résolution exacte, les méthodes numériques, notamment dans le domaine de la mécanique des fluides numérique (CFD pour Computational Fluid Dynamics), peuvent être employées [27].

La loi de Newton fournit une description simple de la convection thermique d'une surface vers son environnement (**Figure II.2**) en éliminant la nécessité de résoudre des équations complexes. Selon cette loi, le flux thermique par convection est directement proportionnel à la différence de température entre la surface d'échange et le fluide environnant à l'infini. Bien que cette loi soit dépourvue de fondement théorique et soit purement comportementale, elle est largement adoptée en raison de sa simplicité et de sa praticité [27].

$$\Phi_{conv} = h S (T_S - T_\infty) \quad (\text{II.6})$$

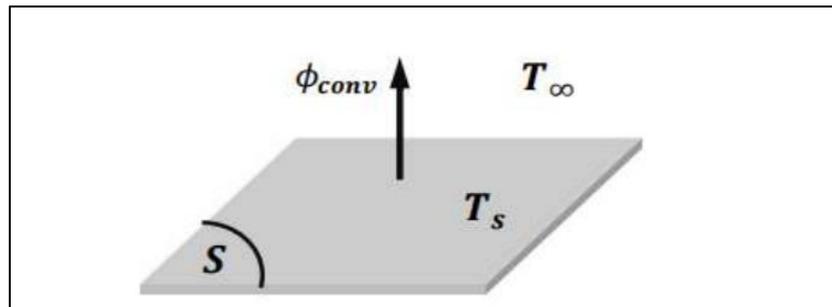


Figure II.2 Echange thermique par convection.

Avec :

- ϕ_{conv} : Flux de chaleur transmis par convection [W].
- h : Coefficient de transfert de chaleur par convection [$W m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$].
- T_s : Température de surface du solide [$^\circ C$].
- T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide [$^\circ C$].
- S : Aire de la surface de contact solide/fluide [m^2].

L'utilisation de cette formule de Newton nécessite de connaître ou d'identifier la valeur du coefficient de convection h . Ce dernier dépend d'un certain nombre de paramètres [27] :

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

On peut distinguer deux types de convection [27] :

- La convection naturelle (ou libre) : Le mouvement du fluide est engendré par les variations de densité causées par les variations de température au sein du fluide ;
- La convection forcée : Le mouvement du milieu est engendré par un dispositif externe (le vent, pompe ,un ventilateur...).

II.4.3 Rayonnement

Le rayonnement est l'énergie émise par la matière sous forme d'ondes électromagnétiques (ou photons) à la suite des changements dans les configurations électroniques des atomes ou des molécules. Contrairement à la conduction et à la convection, le transfert d'énergie par rayonnement ne nécessite pas la présence d'un milieu intermédiaire (**Figure II.3**), s'exprime par la loi de Stefan-Boltzmann [29] :

$$\phi_{ray} = \sigma \varepsilon T^4 \quad (II.7)$$

Avec :

- ϕ_{ray} : Flux de chaleur transmis par rayonnement [W].
- σ : Constante de Stephan [$5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$].
- ϵ : émissivité, indice valant 1 pour un corps noir et qui est compris entre 0 et 1 selon l'état de surface du matériau.
- T : température du corps [K].

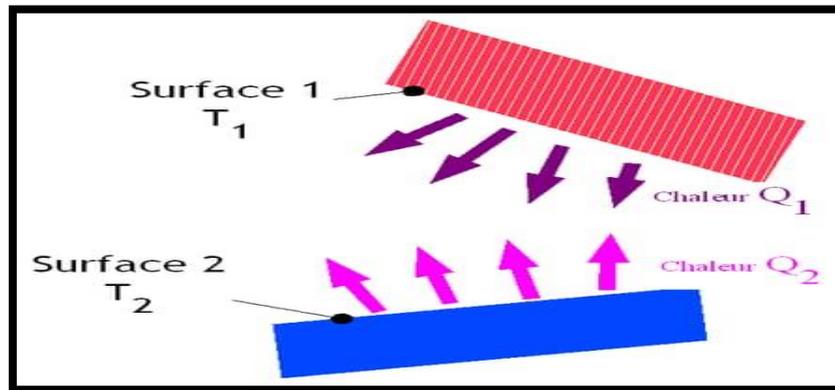


Figure II.3. Transfert de chaleur par rayonnement.

II.5 Modélisation thermique

La modélisation thermique des composants électroniques de puissance (EP) et des convertisseurs est essentielle pour garantir la fiabilité de leurs performances. En analysant le comportement thermique, nous pouvons maintenir l'intégrité de ces systèmes, en particulier compte tenu de l'accent mis actuellement sur l'amélioration de la densité de puissance et le fonctionnement dans des conditions difficiles, en comprenant des températures élevées. Ce défi se pose dans divers secteurs tels que les transports, l'aviation et l'aérospatiale [27].

L'objectif des études thermiques d'un composant est de lui permettre de remplir sa fonction tout en restant en dessous de sa température maximale de fonctionnement, préservant ainsi sa durée de vie. Les deux problèmes peuvent être très bien résolus unique. La première concerne les dimensions du composant et donc la détermination des caractéristiques géométriques et des propriétés physiques qui composent le composant. La seconde identifie le point critique de fonctionnement du composant et définit ainsi les grandeurs électriques d'entrée (courant, tension, fréquence, etc.) permet de limiter sa température en dessous de la température maximale [27].

II.6 Méthodes de résolution

Il existe plusieurs méthodes de résolution, analytique, expérimentale (réduite) et numérique. Ces dernières sont des méthodes qui résolvent directement les équations différentielles. Le domaine discrétisé sera caractérisé par un certain nombre de points nodaux ou les fonctions inconnues seront évaluées. Avec le développement des ordinateurs ces méthodes trouvent un large champ d'utilisation. Les plus couramment utilisées, nous citons la méthode des différences finies, la méthode des volumes finis et celle des éléments finis a pour objets de ce travail [30].

II.6.1 Méthodes analytiques

Les modèles thermiques analytiques utilisent des méthodes mathématiques pour résoudre avec précision l'équation de la chaleur liée au circuit. Ces modèles offrent une expression analytique de la répartition de la température dans le circuit. Les modèles thermiques pour les circuits intégrés sont principalement basés sur les séries de Fourier et les fonctions de Green [31].

☛ Méthodes basées sur les séries de Fourier

Les séries de Fourier jouent un rôle important en mathématique, notamment en analyse harmonique et en théorie du signal.

Les séries de Fourier peuvent être utilisées pour résoudre l'équation de la chaleur dans des domaines à géométrie rectangulaire. Par exemple le bloc homogène de la **figure II.4**, qui pourrait servir de modèle très simplifié de puce de circuit intégré.

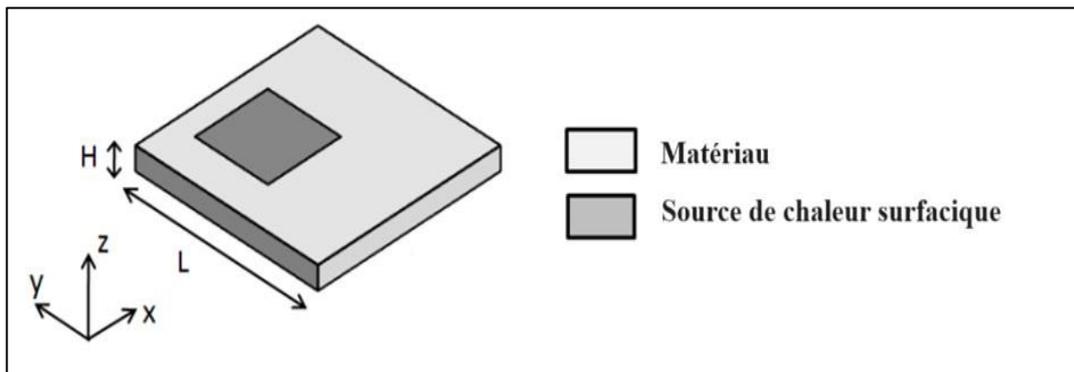


Figure II.4. Bloc homogène contenant une source de chaleur surfacique [31].

La méthode des séries de Fourier permet d'écrire la température dans le bloc sous la forme :

$$T = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \cos(m\pi \frac{x}{L}) \cos(n\pi \frac{y}{L}) (A_{mn} e^{\gamma z} + B_{mn} e^{-\gamma z}) e^{i\omega t} \quad (\text{II.8})$$

Où les coefficients A_{mn} et B_{mn} sont calculés à partir des conditions aux limites et γ est un nombre complexe vérifiant la relation :

$$\gamma^2 = \left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + j\omega \frac{\rho c_p}{k} \quad (\text{II.9})$$

✚ Méthodes basées sur les fonctions de Green

Les fonctions de Green sont très utilisées en physique pour la résolution de problèmes aux dérivées partielles. Pour certains types d'équations et certaines conditions aux limites, la forme analytique des fonctions de Green est connue. La solution du problème s'obtient alors par un produit de convolution avec la fonction de Green. Les fonctions de Green sont utilisées par Zhan et al. Pour calculer efficacement la température en régime permanent dans un circuit intégré. Zhan et al. Considèrent une géométrie et des conditions aux limites extrêmement simplifiées, illustrées sur la **figure II.5** Le circuit est modélisé comme un empilement de couches homogènes ayant les mêmes dimensions latérales. La chaleur s'échappe uniquement par convection à travers la surface supérieure du circuit [31].

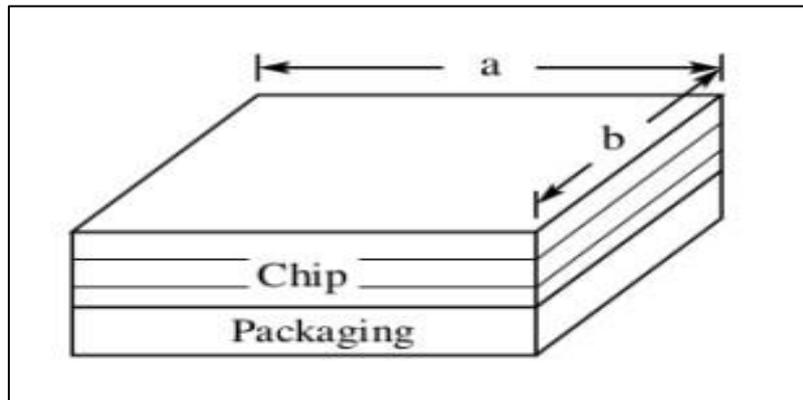


Figure II.5 Géométrie et conditions aux limites [31].

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(r)}{\partial x} \Big|_{x=0,a} = \frac{\partial T(r)}{\partial y} \Big|_{y=0,b} = \frac{\partial T(r)}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \\ k_N \frac{\partial T(r)}{\partial z} \Big|_{z=-d_N} = h(T(r)|_{z=-d_N} - T_a) \end{aligned} \quad (\text{II.10})$$

Pour calculer la température à l'aide des fonctions de Green, Zhan et al. Procèdent en trois étapes [31] :

- Calcul dans le domaine fréquentiel de la distribution de puissance en utilisant la transformée en cosinus discrète (DCT).
- Calcul dans le domaine fréquentiel de la température en multipliant chaque composante fréquentielle de la densité de puissance par la réponse fréquentielle correspondante du système, donnée par la fonction de Green.

- Utilisation de la transformée inverse (IDCT) pour obtenir la température à partir de sa représentation fréquentielle.

II.6.2 Méthodes expérimentales

L'expérimentation est de loin l'étape la plus difficile du procédé scientifique : chaque expérience réalisée est un cas spécial, elle demande imagination tout en respectant des normes précises. L'expérimentation est le seul moyen précis d'évaluer les différentes hypothèses qui ont été émises, elle servira à aller chercher des données, c'est-à-dire des informations qui serviront à confirmer ou à infirmer une hypothèse. Dans la mesure du possible, il est préférable d'aller chercher des résultats mathématiques car elles sont objectives et résistent bien à la subjectivité.

Il est nécessaire d'exercer un contrôle rigoureux de l'expérience à réaliser. Les étapes principales à respecter pour que l'expérimentation soit conforme aux normes scientifiques sont les suivantes [32] :

- Objectif à atteindre (émission d'hypothèses, formulation).
- Procédure d'analyse expérimentale et matériel expérimental.
- Résultats (appelés données).
- Interprétation des résultats et validation.

II.6.3 Méthodes numériques

Il existe plusieurs méthodes numériques de résolution de problèmes aux limites. Parmi ces méthodes :

- La méthode des éléments finis (Finite Element Method - FEM).
- La méthode des volumes finis (Finite Volume Method - FVM).
- La méthode des différences finies (Finite Difference Method - FDM).

Méthode des éléments finis (FEM)

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes numériques les plus utilisées actuellement, son champ d'application ne cesse de s'élargir. Le succès de la méthode est que sa formulation utilise des procédés standards qui se répètent au cours de la résolution de problèmes de nature différente. La méthode utilise une formulation intégrale de type Galerkin. Les fonctions de base de la méthode de Galerkin sont remplacées par des fonctions de forme standard [32].

Cette méthode consiste à subdiviser le volume ou la surface constituant le domaine de résolution en éléments finis interconnectés de formes diverses. Elle est basée sur une formulation intégrale du problème aux limites. Parmi les formulations intégrales utilisées, on

peut citer la méthode des résidus pondérés et la formulation variationnelle qui consiste à construire un fonctionnel représentant l'état énergétique du système [33].

La solution globale, est alors construite sur chacun des éléments du maillage et elle doit vérifier les équations aux dérivées partielles, ainsi que ses conditions aux limites. Sur chaque élément fini, la solution est décrite par une interpolation polynomiale, en fonction des valeurs nodales de l'inconnue [33].

🌈 Méthode des volumes finis (FVM)

La méthode des volumes finis est une méthode alternative à la méthode des différences finies. Toutes deux permettent de résoudre des systèmes d'équations aux dérivées partielles. Le principe de la méthode des volumes finis est basé sur le calcul de la forme intégrale de l'équation aux dérivées partielles. Elle a une simplicité de mise en œuvre par rapport à la méthode des éléments finis et une souplesse pour la représentation des géométries complexes. Ainsi la méthode garantit la propriété de conservation qui peut être absente dans les deux autres méthodes [33].

🌈 Méthode des différences finies (FDM)

La méthode des différences finies est basée sur l'approximation des fonctions dérivées apparaissant dans les équations de formulation du problème. Les fonctions dérivées sont écrites sous une forme approchée en utilisant le développement limité de Taylor. L'équation aux dérivées partielles est ainsi approchée par une équation aux différences finies. Cette équation est écrite ou projetée en un point du maillage sous forme de schéma [32].

La méthode FDM utilise trois approximations pour discrétiser les dérivées partielles de la fonction ϕ aux noeuds du maillage [31] :

- Le schéma « décentré en avant », qui est une approximation du 1er ordre :

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{i,j} \simeq \frac{\phi_{i+1,j} - \phi_{i,j}}{\Delta x} \qquad \left. \frac{\partial \phi}{\partial y} \right|_{i,j} \simeq \frac{\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j}}{\Delta y} \qquad \text{(II.11)}$$

- Le schéma « décentré en arrière », qui est une approximation du 1er ordre :

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{i,j} \simeq \frac{\phi_{i,j} - \phi_{i-1,j}}{\Delta x} \qquad \left. \frac{\partial \phi}{\partial y} \right|_{i,j} \simeq \frac{\phi_{i,j} - \phi_{i,j-1}}{\Delta y} \qquad \text{(II.12)}$$

- Le schéma « centré », qui est une approximation du 2ème ordre :

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{i,j} \simeq \frac{\phi_{i+1,j} - \phi_{i-1,j}}{2\Delta x} \qquad \left. \frac{\partial \phi}{\partial y} \right|_{i,j} \simeq \frac{\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j-1}}{2\Delta y} \qquad \text{(II.13)}$$

II.7 Grandeurs thermiques

II.7.1 Température

Grandeur physique qui décrit l'état thermique d'un corps [35] :

- C'est une mesure de l'énergie cinétique moyenne des constituants élémentaires (atomes ou molécules) d'un corps.
- L'unité légale (S.I) de température est le KELVIN (symbole : K).

$$1\text{Kelvin} = \frac{\text{Température Point Triple de l'eau}}{273,16} \quad (\text{II.14})$$

- Échelle Celsius : t (en °C) = T (en K) - 273, 15
- La température du point triple de l'eau est : $T = 273,15$ K ou $t = 0$ °C.

II.7.2 Champ de température

La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire $T = f(x, y, z, t)$ appelé champ de température. Si le champ de température est indépendant du temps, le régime est dit permanent (ou stationnaire). Dans le cas contraire, il est dit variable [36].

II.7.3 Gradient de température

Tous les points de l'espace qui ont la même température, définissent une surface dite surface isotherme. La variation de la température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température [36].

$$\overrightarrow{\text{grad}T} = \frac{\partial n}{\partial T} \vec{n} \quad (\text{II.15})$$

- $\frac{\partial n}{\partial T}$: Dérivée de la température le long de la normale ;
- \vec{n} : Vecteur unitaire de la normale.

II.7.4 Quantité de Chaleur

La chaleur est une forme particulière de travail, qui correspond à une augmentation ou diminution de l'agitation des particules élémentaires constituant la matière.

Le premier Principe de la Thermodynamique exprime l'équivalence de la chaleur et du travail, qui sont deux formes différentes d'un même concept : L'énergie [35].

La quantité de chaleur peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$Q = m \times c \times \Delta T \quad (\text{II.16})$$

Avec :

- Q : Quantité de chaleur (en J) ;

- m : Masse du système (en kg) ;
- c : Capacité thermique massique du système (en $\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C}$) ;
- ΔT : Variation de température du système (en $^\circ\text{C}$).

II.7.5 Equation de la chaleur

L'équation de la chaleur s'écrit en toute généralité [37] :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c_v \rho} \nabla^2 T + \frac{p}{c_v \rho} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

- T : Température ;
- λ : Conductivité thermique ;
- c_v : Capacité thermique massique à volume constant ;
- ρ : Masse volumique ;
- p : Puissance volumique dégagée (par exemple dans le cas d'un résistor, p est la puissance dissipée par effet Joule) ;
- ∇ : Nabla ;
- ∇^2 : Laplacien.

II.7.6 Flux thermique

Le flux thermique est la quantité d'énergie thermique qui traverse une surface isotherme par unité de temps. Il est appelé « puissance thermique » pour les équipements thermiques tels que les radiateurs [38].

$$\Phi = \frac{\Delta Q}{\Delta x} \quad (\text{II.18})$$

Le flux s'exprime en :

- Watt : W (SI) ;
- Calorie par seconde : $\text{kcal}\cdot\text{s}^{-1}$ (unité utilisée par les thermiciens, car plus proche de la réalité des grandeurs).

II.7.7 Densité de flux thermique

La densité de flux thermique (ou flux thermique surfacique), c'est le flux thermique par unité de surface. La densité de flux thermique s'exprime en watt par mètre carré ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) [38].

$$\varphi = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{1}{S} \frac{\delta Q}{dt} \quad (\text{II.19})$$

Si la densité de flux est uniforme sur la surface considérée :

$$\varphi = \frac{\Phi}{S} \quad (\text{II.20})$$

- S : Surface d'échange.

II.7.8 Conductivité thermique

La conductivité thermique indique la quantité de chaleur qui se propage au travers un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température de 1 degré entre les deux faces [39].

- Symbole : λ ;
- Unité : W/m.K.

Il est important de signaler que l'air est un très bon isolant mais à condition d'être immobilisé. L'air en mouvement évacue la chaleur.

II.7.9 Résistance thermique

Résistance thermique R représente la capacité d'un matériau isolant à s'opposer au flux de chaleur en prenant en compte son épaisseur [39] :

$$R = e / \lambda \quad (\text{II.21})$$

- R : Résistance thermique exprimée en mètre carré Kelvin par Watt ($\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$) ;
- e : Epaisseur du matériau exprimé en mètre ;
- λ : Conductivité thermique.

II.8 Analogique thermique/électrique

La loi de Fourier peut être considérée comme complètement analogue à la loi d'Ohm comme le montre le tableau suivant :

Tableau II.1 Analogies entre la loi de Fourier et la loi d'Ohm [40].

Thermique	Électricité
Loi de Fourier. $\varphi = -\lambda \frac{dT}{dx}$	Loi d'Ohm $\Delta V = R.I$
Conductivité thermique. $\lambda(T)$	Conductivité $\sigma(T)$
Température. T	Potentiel électrique. V
Puissance thermique. P	Intensité de courant. I
Résistance thermique. $R = e / \lambda$	Résistance électrique. R

II.9 Couplage Electromagnétique et Thermique

Lors du fonctionnement du transformateur, les deux phénomènes électromagnétique et thermique sont couplés. En effet, les résistances des bobines sont liées aux températures de ces

Chapitre II : Transfert thermique

dernières. Une augmentation donc de la température engendre une variation au niveau des performances électromagnétiques et plus particulièrement des pertes joules. Une augmentation des pertes joules va engendrer une augmentation de la température du système, donc le terme source d'électromagnétisme dans l'équation thermique peut exprimer comme suit [40.41] :

$$P = \frac{1}{2\sigma} J J^* \quad (\text{II.22})$$

Afin d'étudier et de simuler le fonctionnement d'un transformateur, il est judicieux de rendre compte les deux phénomènes couplés. Un programme a été établi selon l'organigramme donné par la **figure II.6** [40.41].

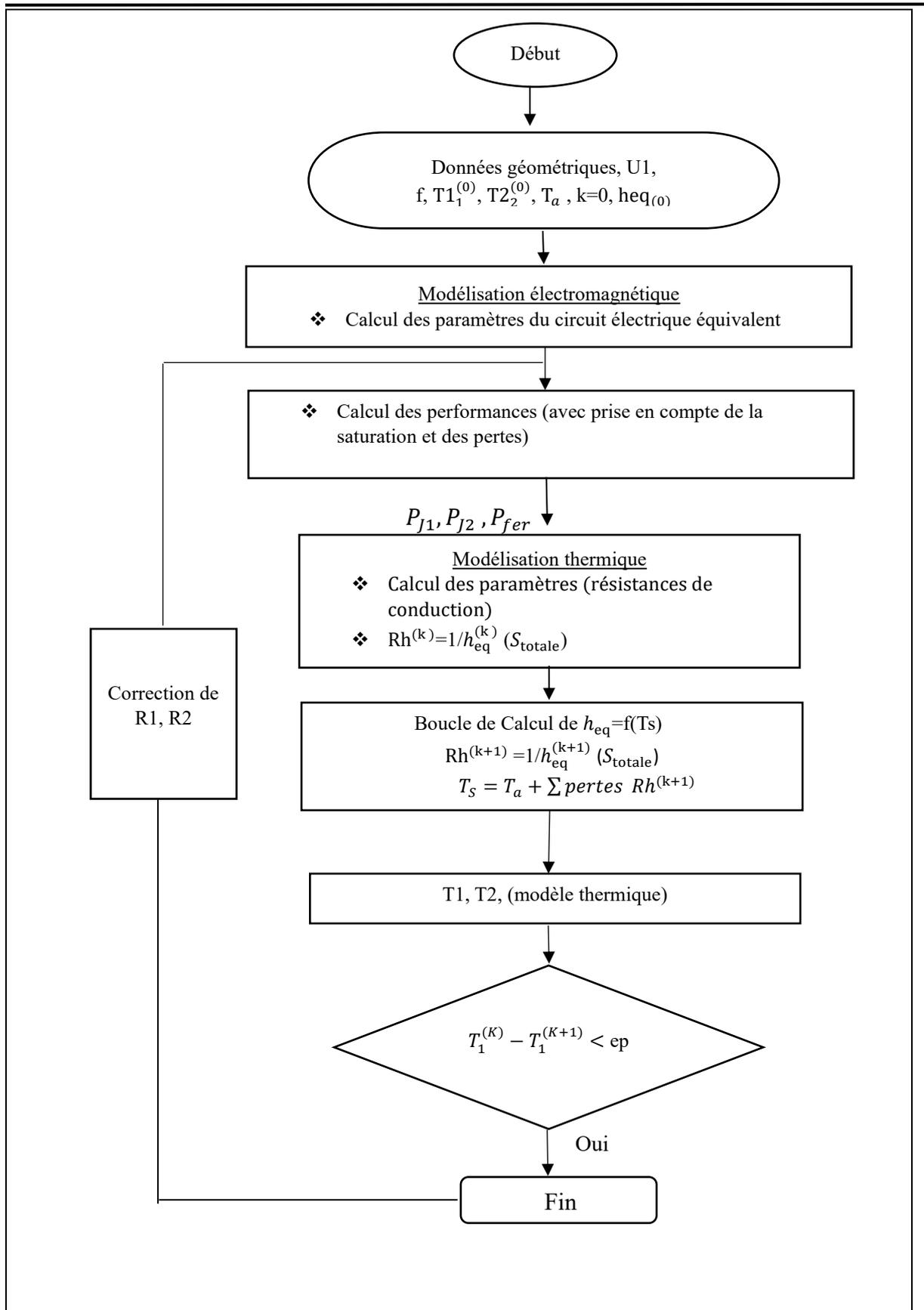


Figure II.6. Organigramme du programme de la simulation du couplage électromagnétique-thermique [41].

II.10 Transfert thermique dans le transformateur

Un transfert de chaleur efficace à l'intérieur d'un transformateur est crucial pour maintenir sa température de fonctionnement idéale. Les principales méthodes de transfert de chaleur dans les transformateurs englobent la conduction, la convection et le rayonnement. La conduction fonctionne dans les composants solides du transformateur, la convection implique le mouvement de l'air ou du fluide de refroidissement pour la dissipation de la chaleur, et le rayonnement permet la libération de chaleur par rayonnement électromagnétique. Ces mécanismes sont conçus pour maintenir la sécurité et l'efficacité du transformateur en gérant efficacement sa température [34].

Les trois modes de transfert thermique dans un transformateur sont :

- **Conduction** : La chaleur est transférée d'une partie du transformateur à une autre par contact direct. C'est le type de transfert thermique dominant dans le noyau et les enroulements. Les métaux peuvent être classés en fonction d'une caractéristique particulière : leur conductivité thermique. C'est une grandeur qui caractérise l'aptitude d'un corps à conduire la chaleur. Plus elle est élevée et plus le matériau conduit la chaleur et donc moins il est isolant. En effet, les électrons de la matière communiquent leur agitation de proche en proche. Cette caractéristique est liée à la conductivité électrique. Le cuivre et l'aluminium sont des matériaux présentant une très forte conductivité thermique. Le bois, le polystyrène ou l'air sont des isolants. Les matériaux isolants permettent de limiter les déperditions de chaleur.
- **Convection** : La chaleur est transférée par le mouvement d'un fluide, tel que l'air ou l'huile, autour du transformateur. La convection naturelle est le mode de refroidissement principal pour les petits transformateurs, tandis que les ventilateurs ou les pompes sont utilisés pour améliorer la convection dans les transformateurs plus grands.
- **Rayonnement** : La chaleur est transférée sous forme d'ondes électromagnétiques. Le rayonnement est un type de transfert thermique relativement faible dans les transformateurs, mais il peut devenir important à des températures élevées.

En résumé, le système de refroidissement du transformateur élimine les pertes et les sources de chaleur des composants métalliques grâce à un ensemble de transferts thermiques entre chaque composant chauffant et l'huile d'une part, et entre l'huile et l'air ou l'eau de l'échangeur d'autre part. d'autre part [34].

✚ Entre les galettes et l'huile se produisent

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

✚ Entre le circuit magnétique et l'huile ont lieu

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

✚ La cuve est concernée par

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

✚ Dans l'échangeur de chaleur se produisent

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

II.11 Pertes dans le transformateur

Il existe différents types de pertes dans les transformateurs, notamment les pertes en fer (les pertes par hystérésis et les pertes par courants de Foucault), les pertes en cuivre. Les pertes par hystérésis sont dues aux changements de magnétisation dans le noyau du transformateur, alors que les pertes en cuivre sont dues à la résistance dans l'enroulement du transformateur [9].

II.11.1 Pertes par effet joule

Les pertes par effet Joule (pertes cuivre) dans les enroulements sont la conséquence de la traversée du courant dans les enroulements. Elles dépendent de la résistance de ces enroulements et de l'intensité du courant qui les traverse. On pourra les calculer à partir des mesures des résistances et des intensités efficaces.

Dans le cas des transformateurs à forte puissance, on diminue ces pertes en limitant la température de fonctionnement. Pour cela on immerge le transformateur dans de l'huile minérale qui permet de le refroidir et d'éviter l'augmentation des résistances [11].

La formule pour calculer les pertes par Joule :

$$P = R \times I^2 \quad (\text{II.23})$$

- **P** : La puissance dissipée sous forme de chaleur (en watts).
- **R** : La résistance du conducteur (Ω).
- **I** : L'intensité du courant électrique traversant le conducteur (A).

II.11.2 Pertes fer

Les pertes en fer sont causées par le flux alternatif dans le noyau du transformateur, cette perte se produisant dans le noyau est également appelée perte du noyau. La perte en fer est ensuite divisée en hystérésis et perte par courants de Foucault [9].

✚ Pertes par hystérésis

À chaque cycle complet du courant, le circuit absorbe une énergie mesurée par la surface de la boucle d'hystérésis. En courant alternatif et pour un matériau spécifique, la forme de la boucle d'hystérésis évolue avec l'augmentation des valeurs du champ [12].

La formule pour calculer les pertes par hystérésis est la suivante

$$P_H = C_H \cdot B_m^2 \cdot f \text{ [W/Kg]} \quad (\text{II.24})$$

Avec :

- C_h : Coefficient d'hystérésis, dépendant de la nature matériau.
- B_m : Valeur maximale de l'induction.
- f : Fréquence de l'alimentation.

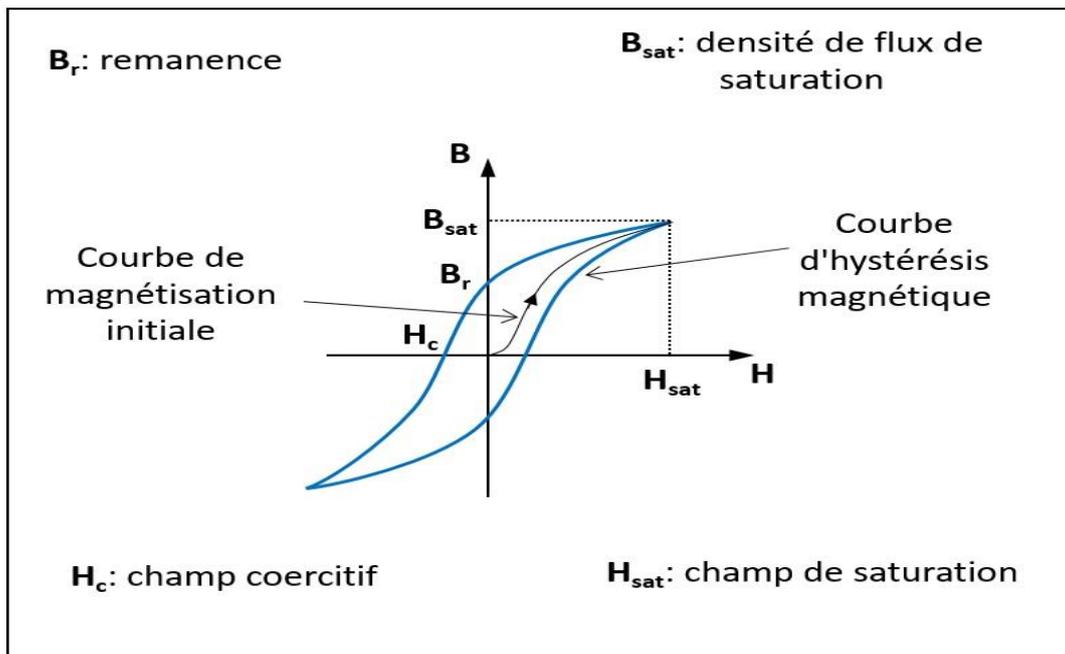


Figure II.7. Courbe de pertes par hystérésis.

✚ Pertes par courant de Foucault

Les courants de Foucault se produisent dans le matériau magnétique conducteur perpendiculairement aux lignes d'induction dans le transformateur. Afin de réduire ces courants et les pertes associées, le circuit magnétique est construit soit en empilant des fines tôles isolées entre elles et disposées parallèlement aux lignes d'induction, soit en utilisant des matériaux magnétiques spéciaux [13].

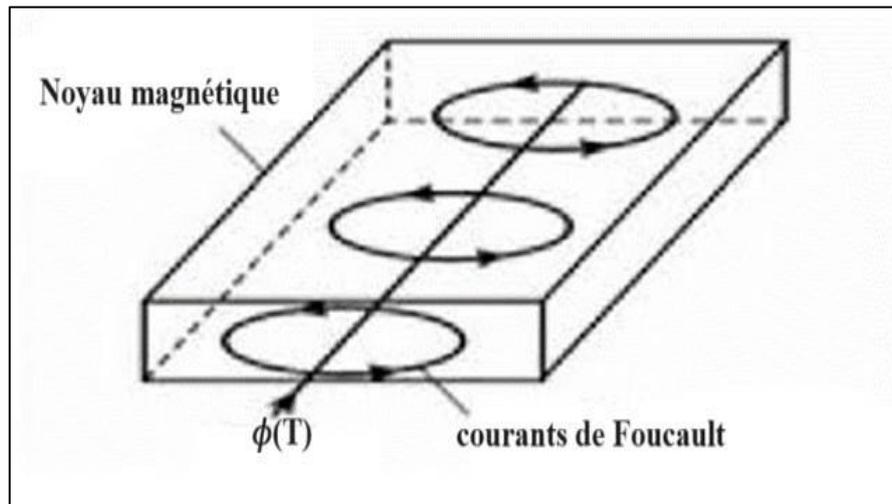


Figure II.8. Courants de Foucault.

II.12 Conclusion

Enfin, dans ce chapitre, nous avons expliqué le concept de transformation thermique et les différentes méthodes dont elle se produit, en plus de la transformation thermique à l'intérieur du transformateur et les problèmes thermiques qui s'y produisent, ainsi que les méthodes de résoudre et de traiter ces problèmes, après quoi nous avons évoqué les différentes pertes qui en résultent.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons les résultats de la simulation du comportement thermique d'un transformateur triphasé à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics.

**CHAPITRE III : ETUDE DU
COMPORTEMENT THERMIQUE
D'UN TRANSFORMATEUR
TRIPHASÉ**

III.1 Introduction

Pour améliorer les performances d'un transformateur triphasé, il convient d'optimiser la conception et de choisir des matériaux de haute qualité tels que l'acier au silicium pour le noyau du transformateur afin de minimiser les pertes de puissance. Le refroidissement efficace du transformateur à l'aide de systèmes de refroidissement appropriés, tels que le refroidissement par huile ou par air, permet de maintenir une température de fonctionnement optimale et d'augmenter la durée de vie du transformateur.

Dans ce dernier chapitre, nous présentons le transformateur de distribution triphasé ce fabrication algérienne (Électro-industrie d'AZAZGA).

Par la suite, nous allons effectuer une résolution du problème thermique du transformateur triphasé présenté. Dans cette étude, la méthode des éléments finis à deux dimensions(2D) mise en œuvre à l'aide de logiciel (COMSOL Multiphysics 6.0) a été utilisée parce qu'elle est très adaptée pour des géométries complexes, où nous étudierons impact de la perte sur la distribution de température dans le transformateur, avec impact combiné de la modification de l'épaisseur de l'isolation et de la perte de volume sur la distribution de température dans le transformateur, et nous montrerons la variation de température en fonction du temps dans la zone des différentes parties du transformateur. Ainsi que pour l'étude des différents phénomènes électromagnétiques dont la saturation du circuit magnétique.

III.2 Logiciel COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique qui englobe toutes les étapes du processus de modélisation : de la définition des géométries, des propriétés des matériaux et de la physique (décrivant des phénomènes spécifiques), à la résolution et au post-traitement de modèles tout en assurant des résultats précis et fiables.

Basé sur la méthode des éléments finis, le logiciel COMSOL Multiphysics est recommandé pour la création de modèles utilisés dans les domaines d'applications spécialisés ou les domaines d'ingénieries. Pour ce faire, il est possible d'étendre le logiciel par des modules complémentaires.

Disposant d'interfaces physiques prédéfinies, ce logiciel permet la simulation de plusieurs physiques et applications en ingénierie à savoir l'électromagnétisme, la mécanique, la thermique, la chimie, ...etc, et particulièrement les phénomènes couplés.

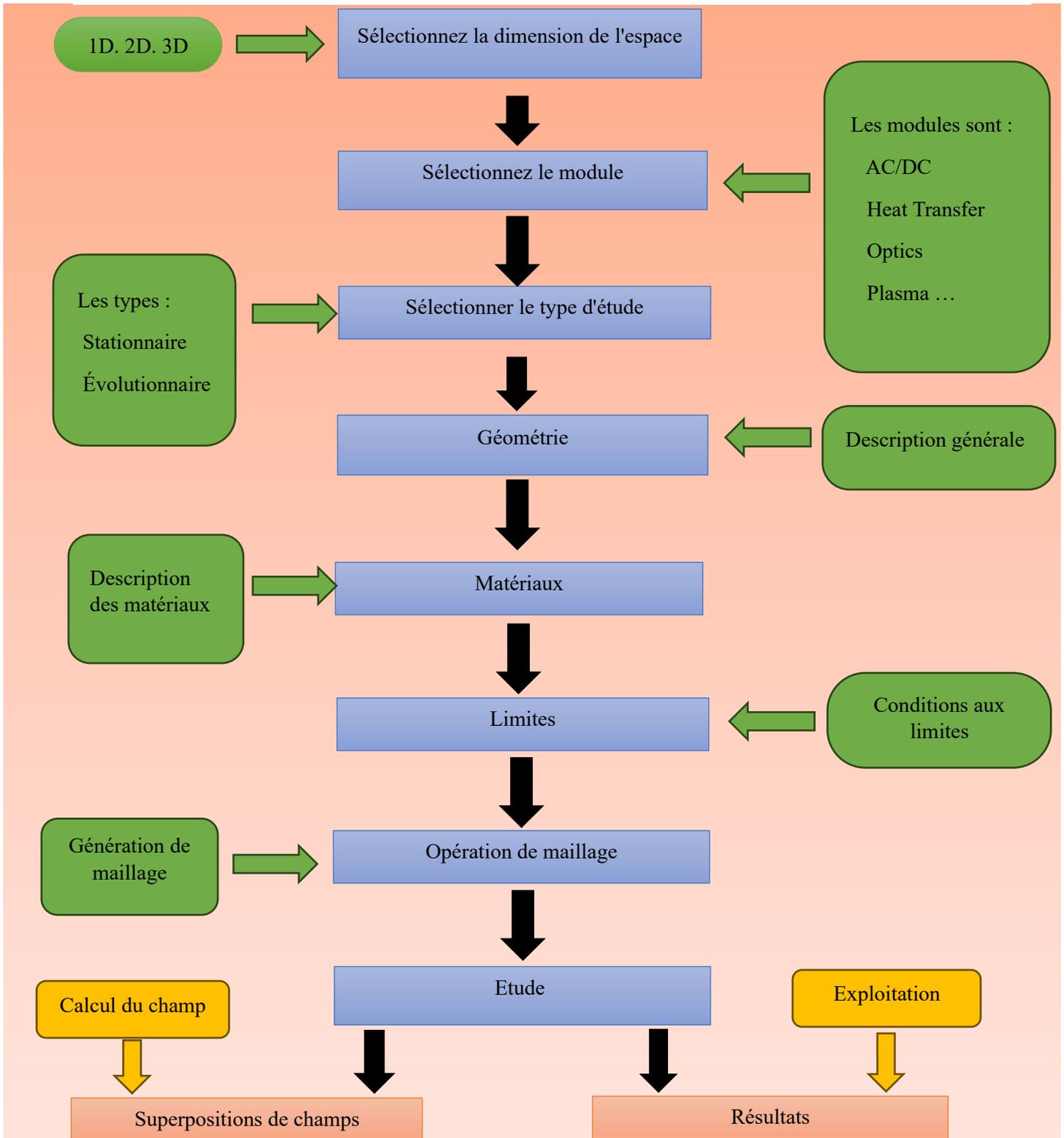
Des modules d'applications optionnels offrent des interfaces spécialisées notamment en mécanique linéaire et non linéaire, acoustique, écoulement, transfert de chaleur, génie

Chapitre III : Etude du comportement thermique d'un transformateur triphasé

chimique, géophysique, électromagnétisme basse et haute fréquence, corrosion, plasma, suivi de particules, optimisation, MEMS, ainsi qu'avec les logiciels de CAO et Matlab [42].

Les étapes de résolution peuvent être résumées selon l'organigramme montré dans le tableau suivant :

Tableau III.1 Diagramme des différentes étapes de résolution dans COMSOL Multiphysics [43].



III.3 Présentation du transformateur étudié

Le transformateur de notre étude est un transformateur triphasé de distribution produit par la société Électro-industrie d'AZAZGA. Nous nous au comportement thermique de ce transformateur afin de déterminer la distribution de la température en son sein. Les dimensions géométriques, les propriétés électriques et les performances nominales de ce transformateur sont décrites ci-après.

III.3.1 Dimensions géométriques

La configuration géométrique du transformateur triphasé en coupe transversale 2D est donnée par la figure III.1.

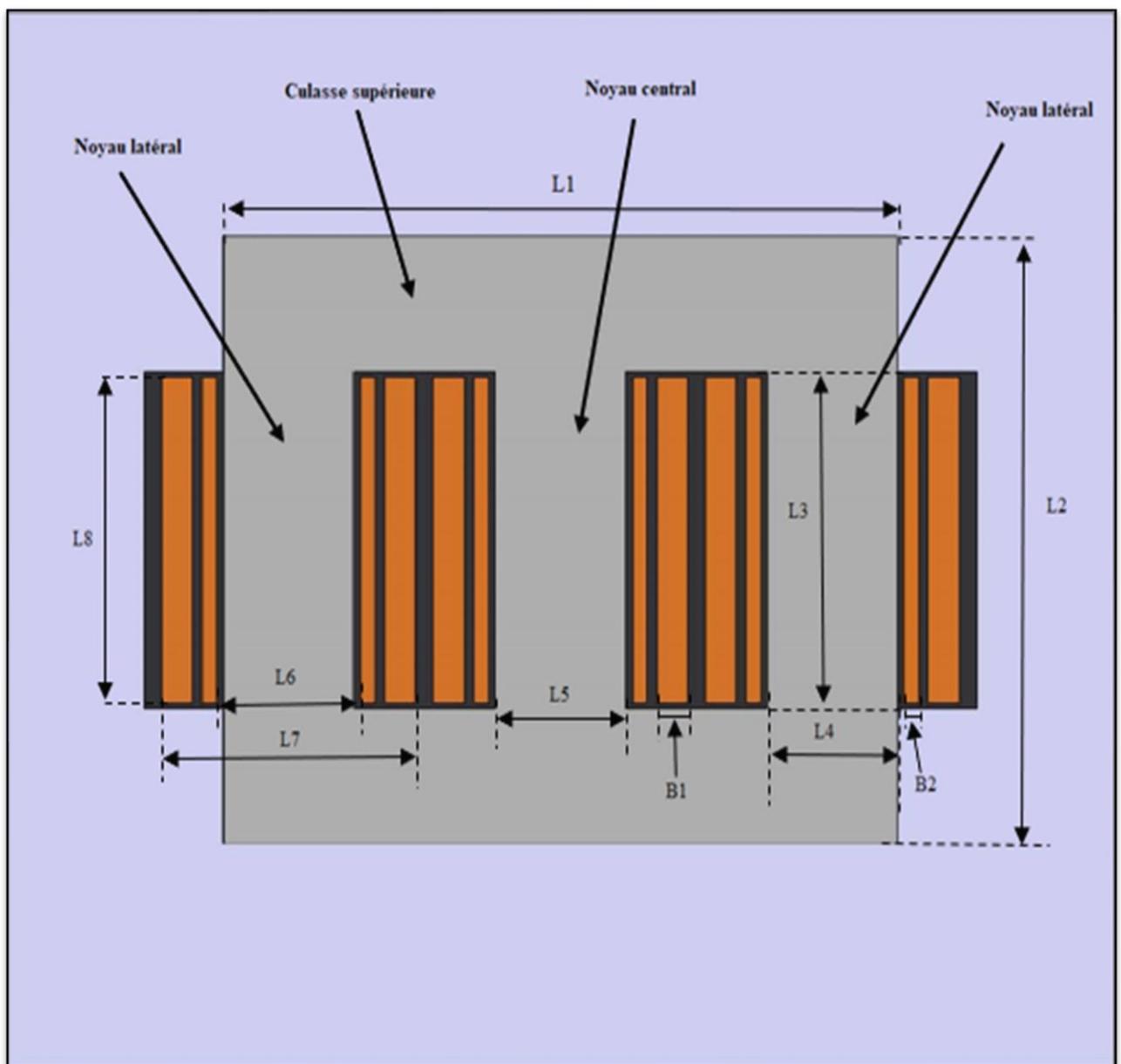


Figure III.1 Configuration géométrique transversal 2D du transformateur triphasé.

Chapitre III : Etude du comportement thermique d'un transformateur triphasé

Les dimensions géométriques du transformateur sont données dans le tableau (III.2) suivant :

Tableau III.2 Données géométrique du transformateur triphasé [7].

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

III.3.2 Propriétés électriques et les grandeurs nominales

Les données du transformateur sont présentées dans le tableau III.3 suivant :

Tableau III.3 Données électriques du transformateur triphasé [7].

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 nominale au secondaire	909	A
Nombre de spires au primaire	3000	-
Nombre de spires au secondaire	22	-
Nombre de couche au primaire	14	-
Nombre de couche au secondaire	2	-
Resistance de l'enroulement primaire	17.33	Ω
Résistance de l'enroulement secondaire	$2.71 \cdot 10^{-3}$	Ω

Inductance de l'enroulement primaire	1.4 1 ^e -3	H
Inductance de l'enroulement secondaire	0.154	H

Les différents matériaux utilisés dans le transformateur :

Tableau III.4 Matériaux utilisés dans le transformateur triphasé [7. 44].

Caractéristique Matériaux	λ Conductivité thermique (W/ (m.K))	Perméabilité relative	Capacité thermique (J/(kg.k))
Air	0.0181	1	1005
Fer (Soft iron)	83	1	450
S-2 Glass fiber (solid)	0.08	1	1100
Cuivre HT/BT	400	1	385

III.4 Simulation du problème thermique

Le modèle thermique du transformateur, défini par les équations de la chaleur régissant la conduction et la convection, doit être résolu en même temps que les conditions aux limites décrites dans le paragraphe ci-dessous. Pour le problème évolutif, la condition initiale doit également être spécifiée. Le modèle thermique 2D du transformateur est analysé à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics [7].

III.4.1 Équation à résoudre des problèmes thermiques

Dans les matériaux solides du transformateurs, l'équation de la conduction, au régime permanent (statique), en bidimensionnel (2D) est :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -\dot{q} \quad (\text{III.1})$$

L'équation de la conduction en 2D décrit la distribution de la température dans un matériau soumis à un flux de chaleur. Dans le cas d'un transformateur triphasé, cette équation est fondamentale pour évaluer l'échauffement des différents composants et ainsi garantir leur fonctionnement optimal et leur durée de vie [7].

L'équation de la conduction, dans le cas linéaire (λ constant) et homogène ($\lambda_x = \lambda_y$), en régime permanent, en coordonnées cartésiennes, s'écrit :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\dot{q}}{\lambda} = 0 \quad (\text{III.2})$$

Où :

- **T** : Température.
- **x, y** : Coordonnées spatiales.
- **q** : Densité volumique de chaleur.
- **λ** : Conductivité thermique.

III.4.2 Conditions aux limites

Pour résoudre ce problème, il est crucial de définir les conditions aux limites géométriques. Cela garantit l'obtention d'une solution unique.

- ✚ Une condition de type Dirichlet est appliquée (avec une température ambiante constante de $T = 293,15 \text{ K}$) sur le contour extérieur de l'air entourant le transformateur. La surface est choisie suffisamment éloignée du transformateur pour éviter l'influence de son échauffement, mais pas trop éloignée pour limiter le domaine d'étude au strict nécessaire.
- ✚ Une condition de convection sur la surface externe du transformateur permet de définir le coefficient de convection pour l'air externe, compris entre $h=30$ et $150 \text{ (W/m}^2\cdot\text{K)}$, en fonction de l'écoulement laminaire ou turbulent. La méthode pour déterminer ce coefficient dépasse le cadre de ce travail. [7]

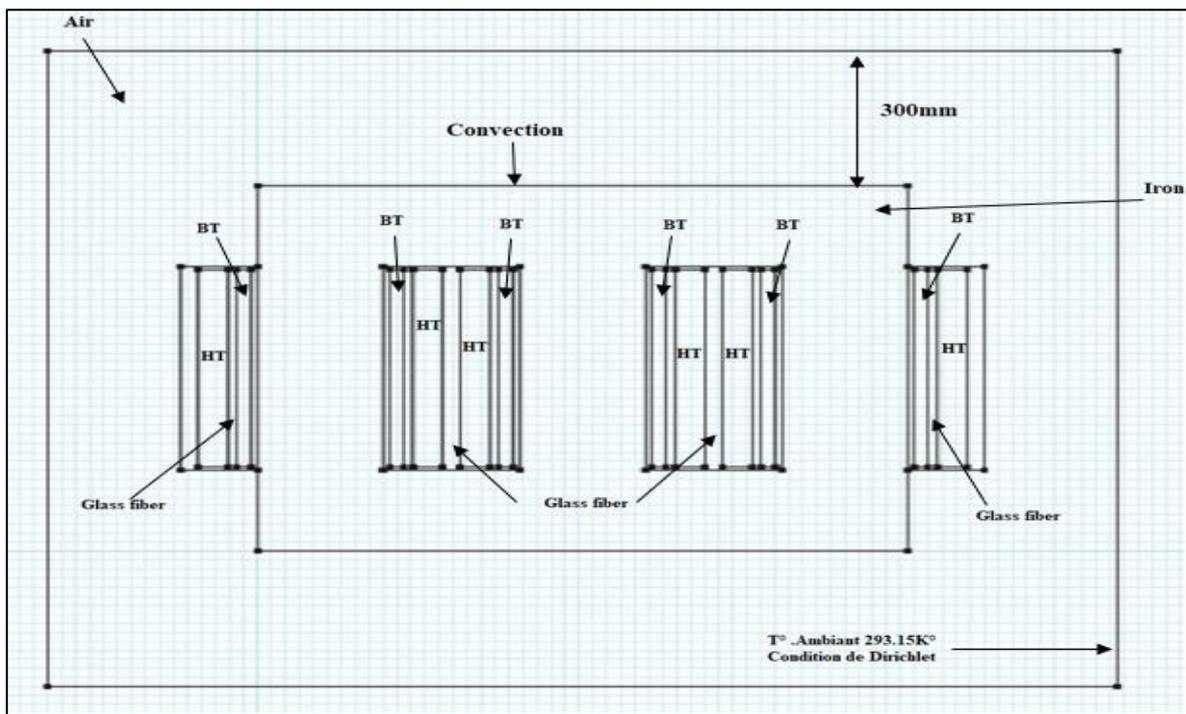


Figure III.2 Conditions aux limites sur le transformateur triphasé.

III.4.3 Maillage en élément finis du transformateur triphasé

Le logiciel COMSOL Multiphysics résout les problèmes après avoir discrétisé le domaine d'étude en créant un maillage composé de triangles aussi petits que possible. Ce maillage permet d'approximer la structure géométrique du système étudié. Un nombre plus élevé d'éléments et de nœuds permet de se rapprocher de la solution exacte, mais entraîne également un temps de

Chapitre III : Etude du comportement thermique d'un transformateur triphasé

calcul plus long. Une étude peut être réalisée pour déterminer les dimensions optimales des éléments finis en fonction des variations de température dans les différentes zones du transformateur.

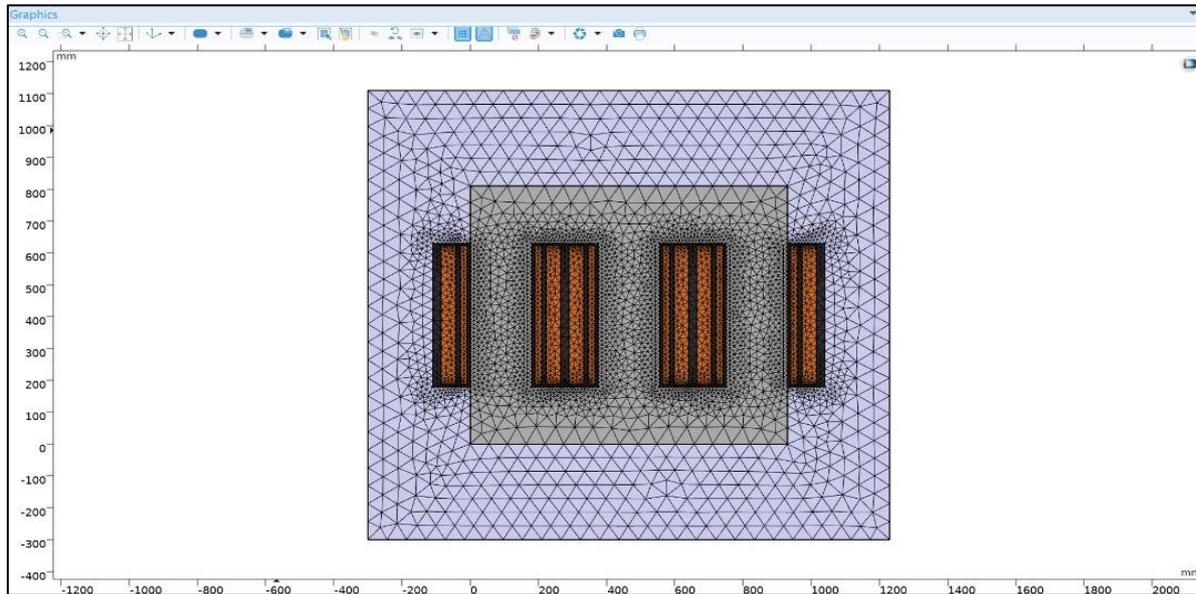


Figure III.3 Maillage en éléments finis du système 2D du transformateur triphasé.

III.5 Etude du comportement thermique d'un transformateur triphasé en état d'équilibre

III.5.1 Flux magnétique dans le transformateur triphasé

La répartition de l'induction magnétique dans le transformateur triphasé est représentée dans la figure III.4 suivante :

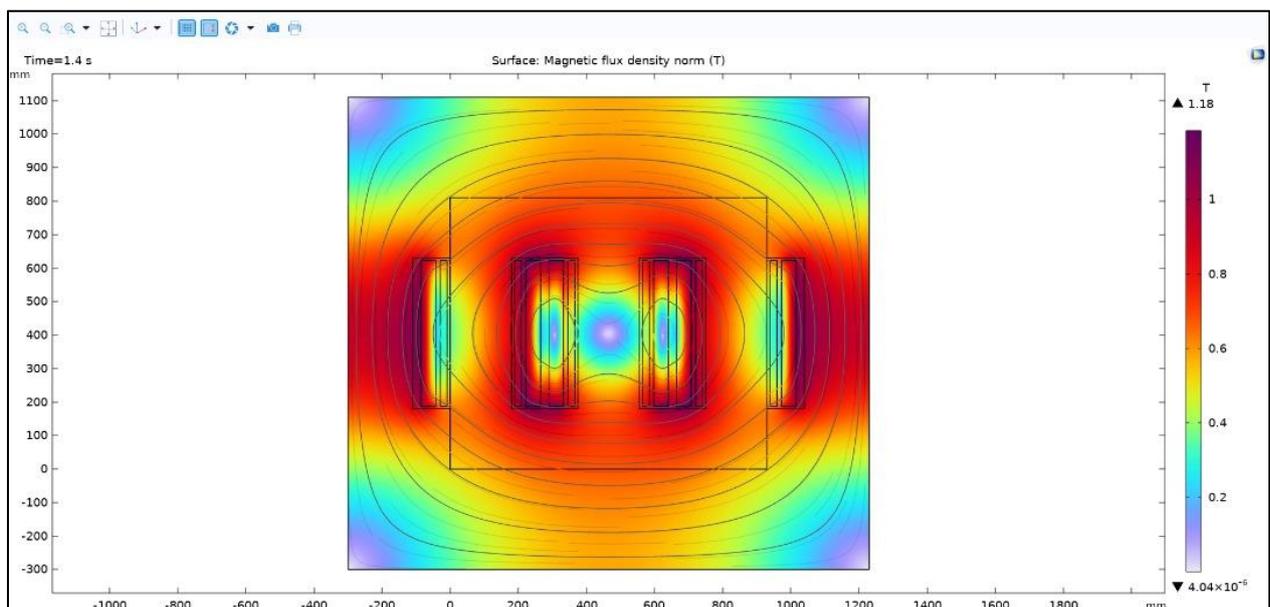


Figure III.4 Induction magnétique dans le transformateur triphasé.

III.5.2 Impact des pertes sur la distribution de la température dans le transformateur

✚ **1^{er} Cas** : En prenant en compte uniquement les pertes Joule.

Dans les deux bobines (HT et BT), on prend en compte les pertes par effet Joule tout en négligeant les pertes fer ($P_{fer}=0$) dans le noyau du transformateur.

Détermination des pertes volumique

L'une des principales causes de l'échauffement des transformateurs électriques sont les pertes joule en particulier au point de fonctionnement nominal

➤ **Dans la bobine BT :**

$$P_{V1} = \frac{R_{BT} I_{BT}^2}{V_{BT}}$$

On a $h_1=1.1$ m, $L=0.436$ m, $l = 0.0205$ m, $I_{BT}=909$ A, $R_{BT}=2.71 \cdot 10^{-3} \Omega$

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

Avec : $S_{BT}=0.008938$ m²

$$V_{BT} = 0.023569$$
 m³

$$P_{V1} = \frac{2.71 \cdot 10^{-3} \cdot 909^2}{0.023569}$$

$$P_{V1} = 95007.065$$
 w/m³

➤ **Dans la bobine HT :**

$$P_{V2} = \frac{R_{HT} I_{HT}^2}{V_{HT}}$$

On a $h_1=1.1$ m, $L=0.436$ m, $l = 0.043$ m, $I_{HT}=12.12$ A, $R_{HT}=17.33 \Omega$

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

Avec : $S_{HT}=0.018748$ m²

$$V_{HT} = 0.052794$$
 m³

$$P_{V2} = \frac{17.33 \cdot 12.12^2}{0.052794}$$

$$P_{V2} = 48219.11$$
 w/m³

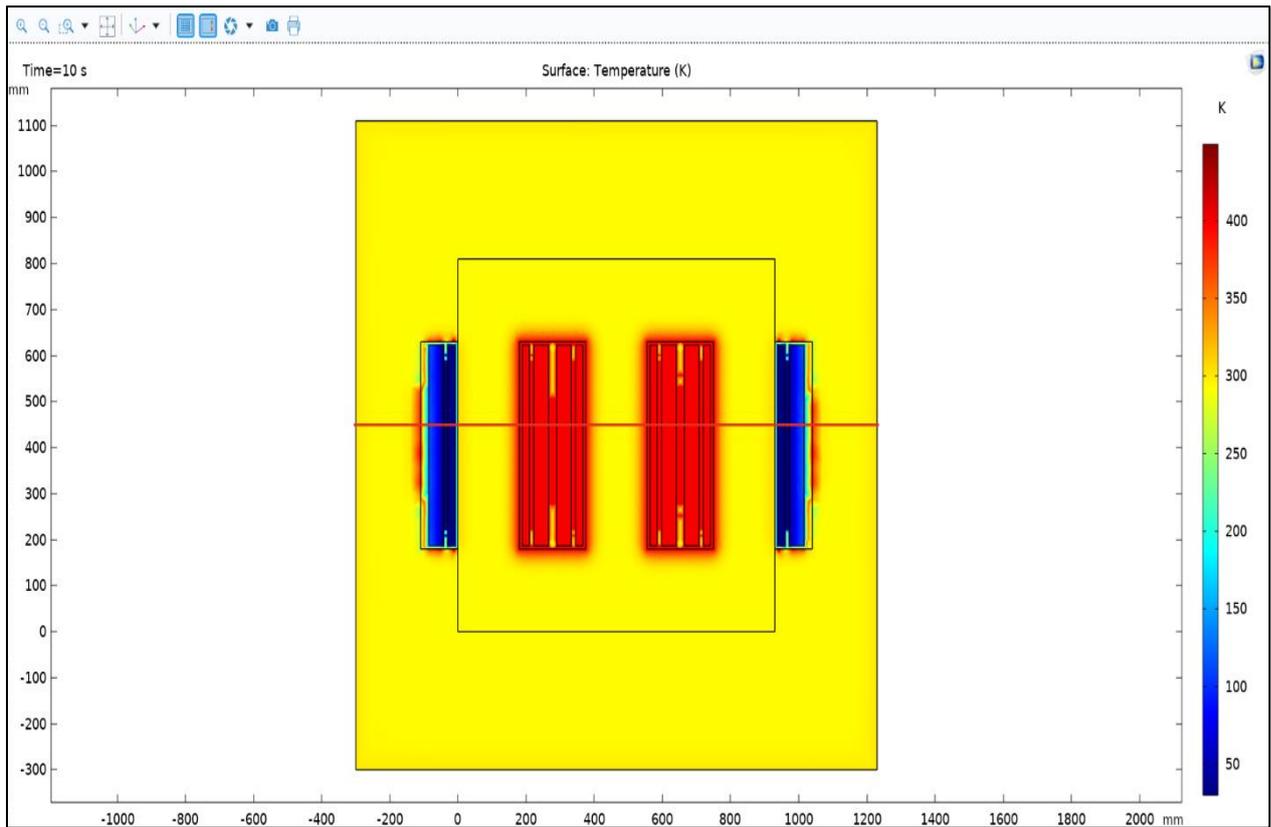


Figure III.5 Répartition de la température dans le transformateur sans pertes fer.

La **figure III.5** représente la distribution de la température, où l'on observe une augmentation significative de la température au niveau des bobines en raison de la présence de pertes par effet Joule.

2^{ème} Cas : Prise en compte des pertes Joule et des pertes fer conjointement.

Calcul des pertes fer pour une induction :

$$B = B_m = 2T$$

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

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

On a :

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

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

$$P_{\text{hys}} = 0.012 \cdot 2^2 \cdot 50$$

Chapitre III : Etude du comportement thermique d'un transformateur triphasé

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

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

$$P_{\text{cf}} = 12.71 \cdot 10^{-5} \cdot 2^2 \cdot 50^2$$

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

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

$$P_{\text{fer(volumique)}} = (2.4+1.271) \cdot 7874$$

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

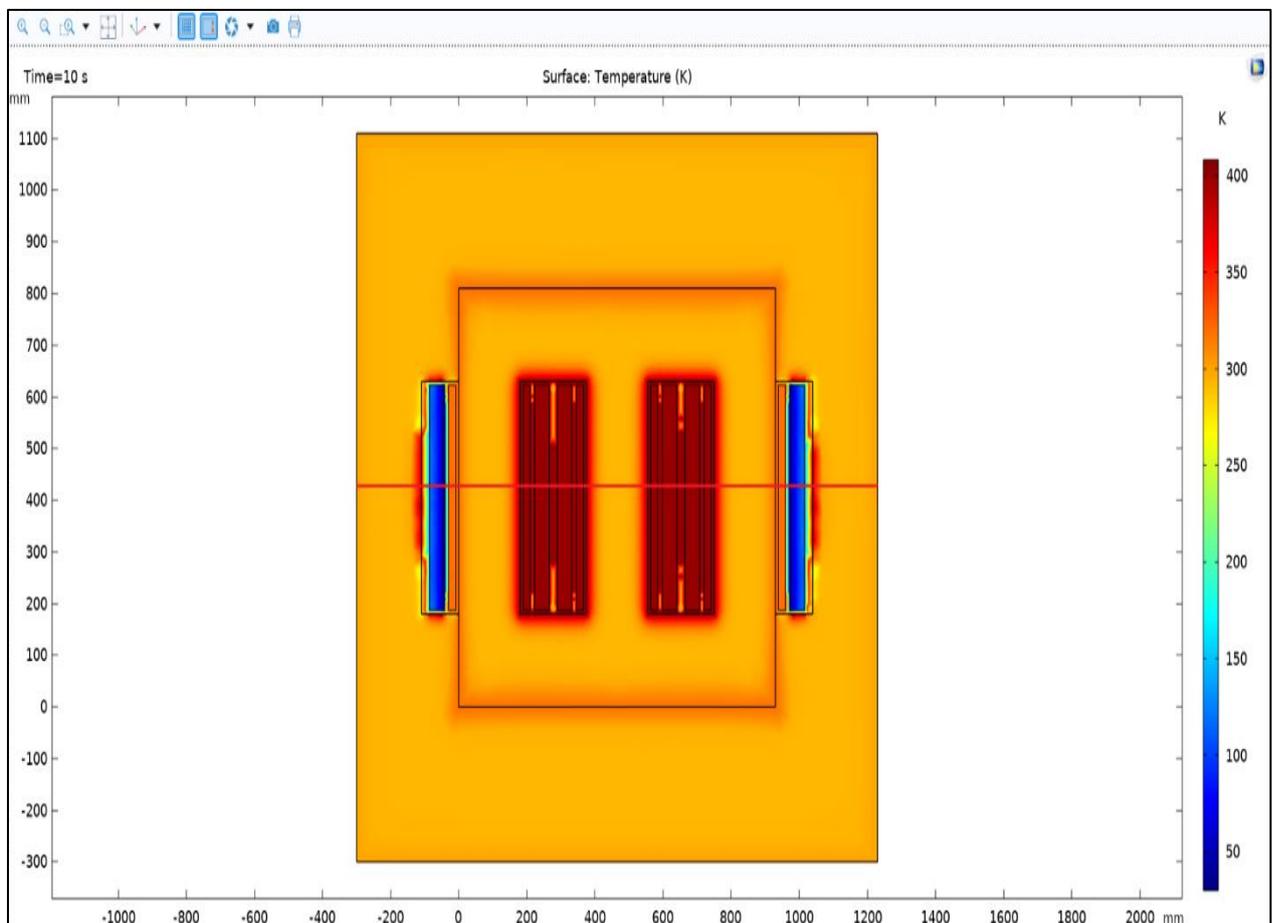


Figure III.6 Répartition de la température dans le transformateur avec prise en compte des pertes fer.

La figure III.6 représente une nouvelle distribution de température, où l'on observe une augmentation de la température du noyau de fer due à la présence de pertes de fer, contrairement au premier cas.

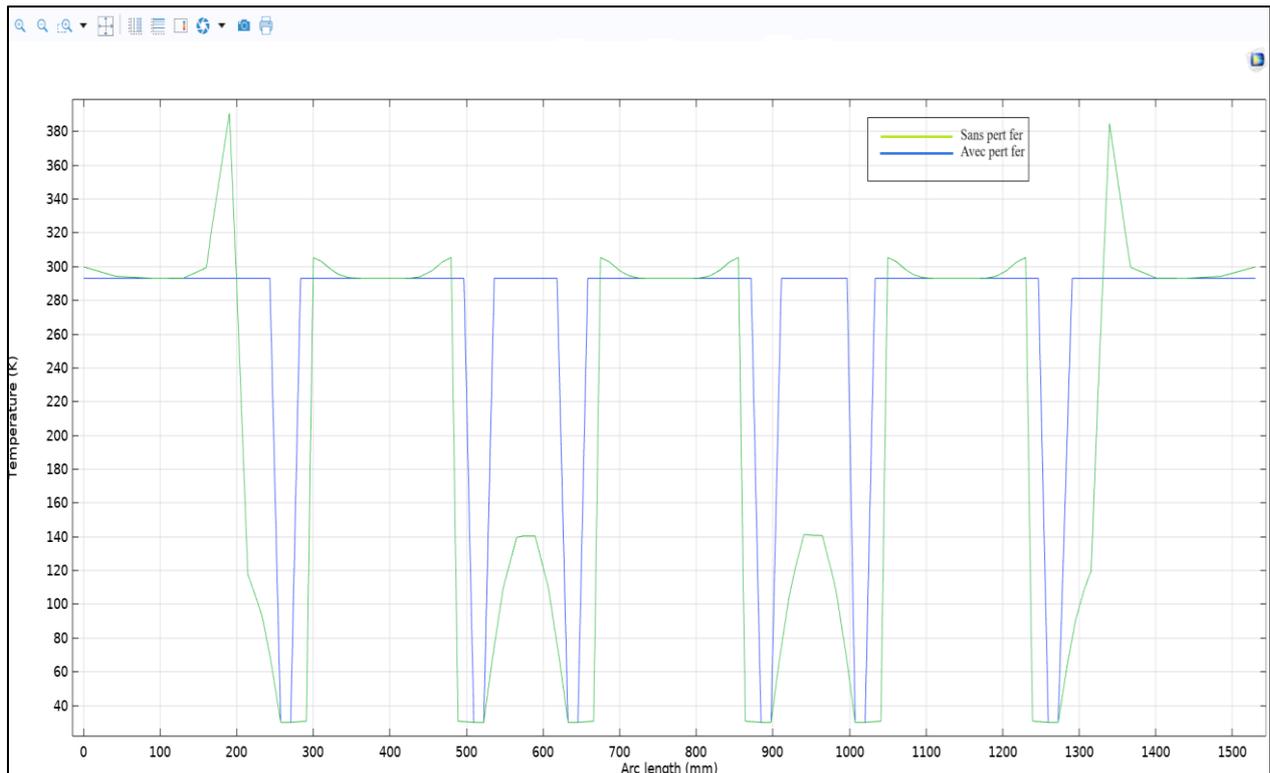


Figure III.7 Courbe de la variation de température dans différentes zones du transformateur le long de la ligne soulignée en rouge des figures (III.5) et (III.6).

La figure III.7 montre un graphique de la distribution de la température en cas sont Pert fer et en cas de pertes fer au niveau du transformateur, où nous remarquons 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. Ainsi, l'une des raisons pour lesquelles la température du transformateur augmente n'est pas uniquement les pertes joules aussi est uniquement les pertes fer qui doivent être contrôlées afin de maintenir l'efficacité du transformateur.

III.5.3 Impacts de la variation de l'épaisseur des isolants sur la répartition de la température dans le transformateur :

Nous avons les trois cas suivants qui représentent des expériences sur l'effet de la variation de l'épaisseur de l'isolation en verre entre les bobines HT et BT sur la température tout en maintenant les mêmes valeurs de pertes fer et de pertes Joule.

➤ Calcul 1 : Épaisseur de l'isolant $d= 0.013$ m

La figure III.8 montre la variation de la température dans le transformateur dans le cas d'une épaisseur d'isolant $d=0.013$ m et pour des pertes constantes.

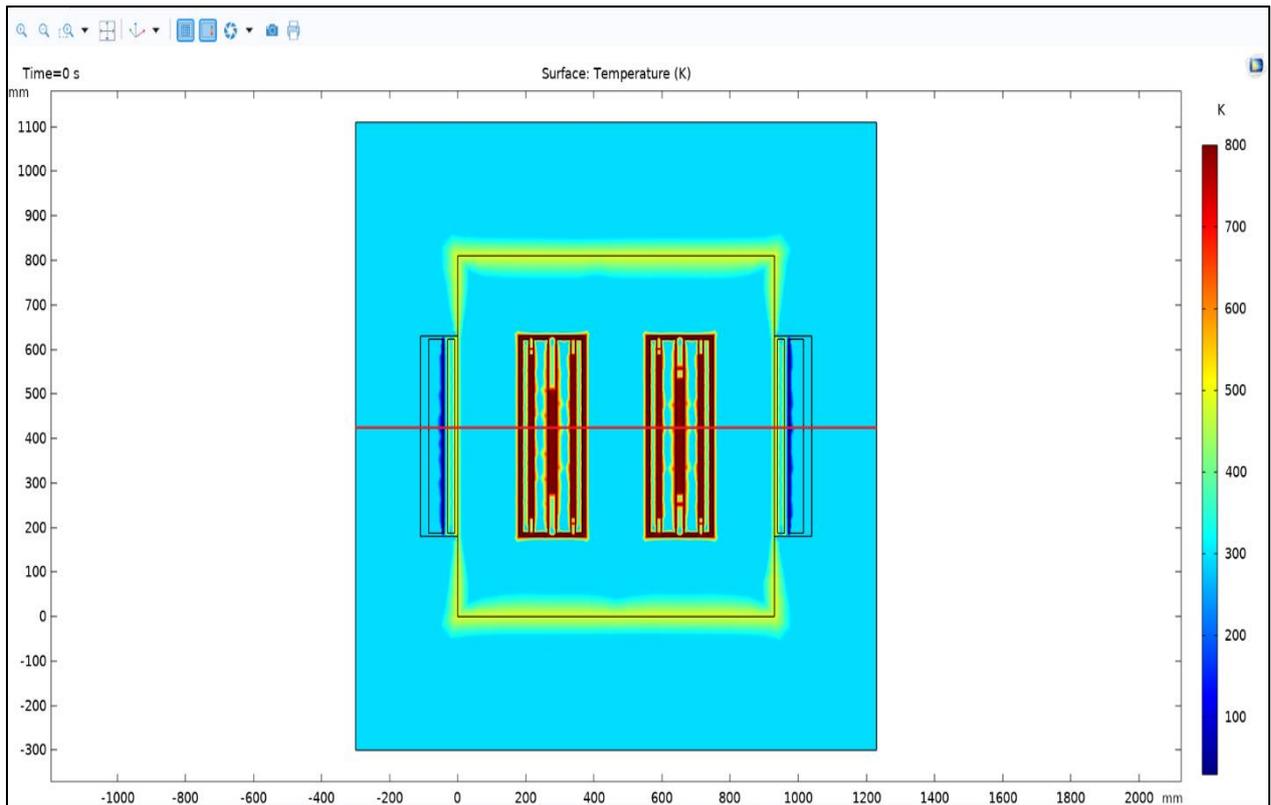


Figure III.8 Répartition de température dans le transformateur $d=0.013$ m.

➤ **Calcul 2 : Épaisseur de l'isolant $d=0.009$ m**

La figure III.9 montre la variation de la température dans le transformateur dans le cas d'une épaisseur d'isolant $d=0.009$ m et pour des pertes constantes.

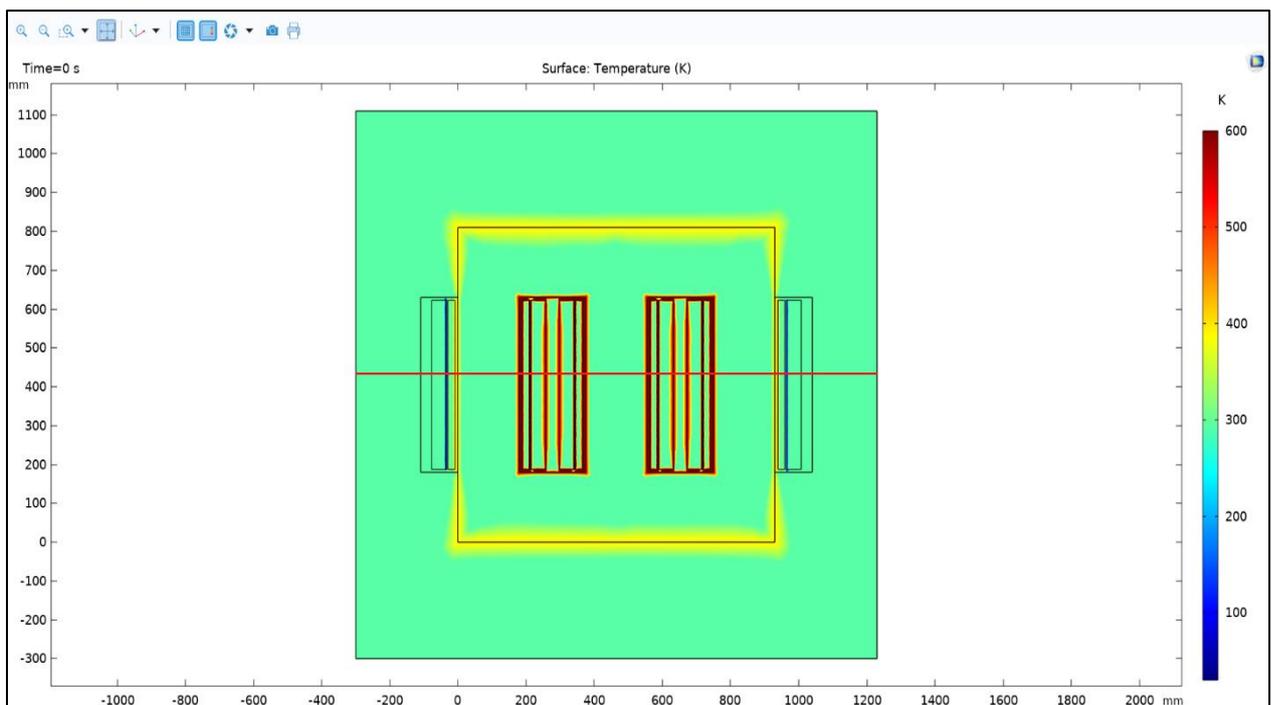


Figure III.9 Répartition de température dans le transformateur $d=0.009$ m.

➤ Calcul 3 : Épaisseur de l'isolant $d=0.005$ m

La figure III.10 montre la variation de la température dans le transformateur dans le cas d'une épaisseur d'isolant. $d=0.005$ m et pour des pertes constantes.

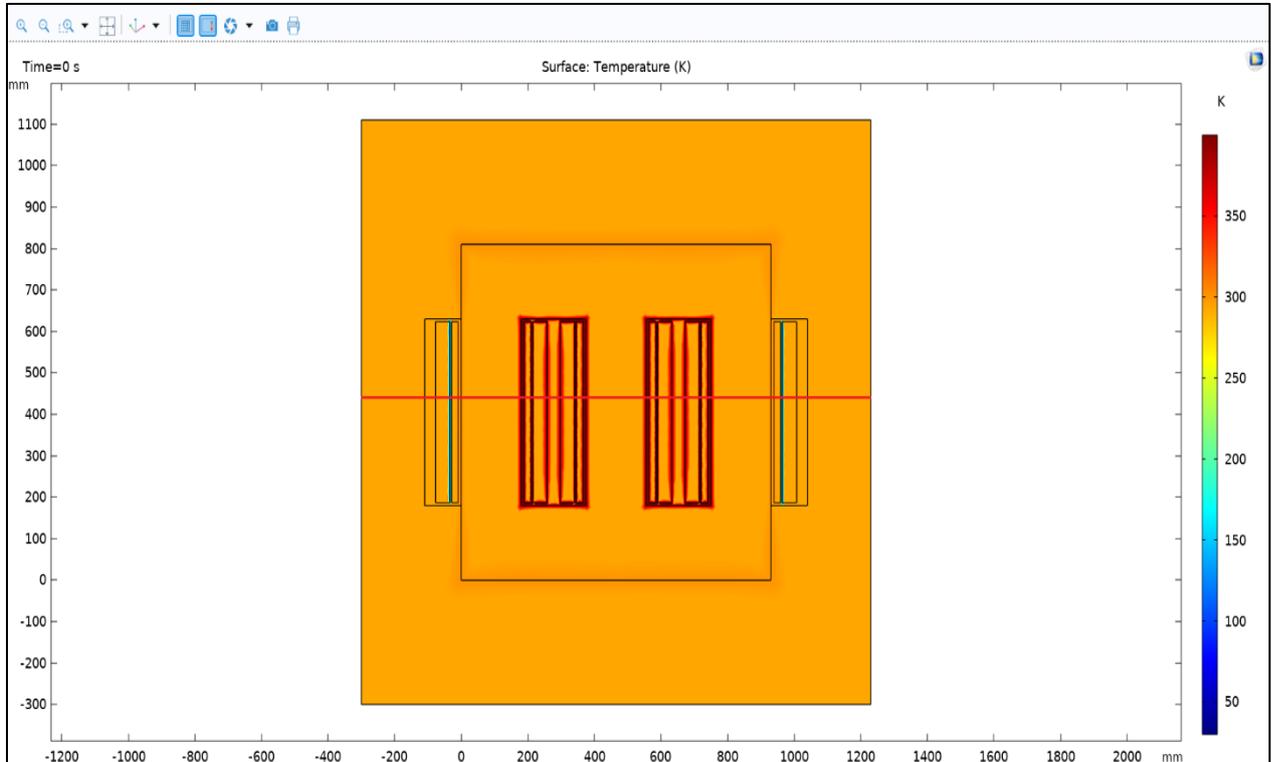


Figure III.10 Répartition de température dans le transformateur $d=0.005$ m.

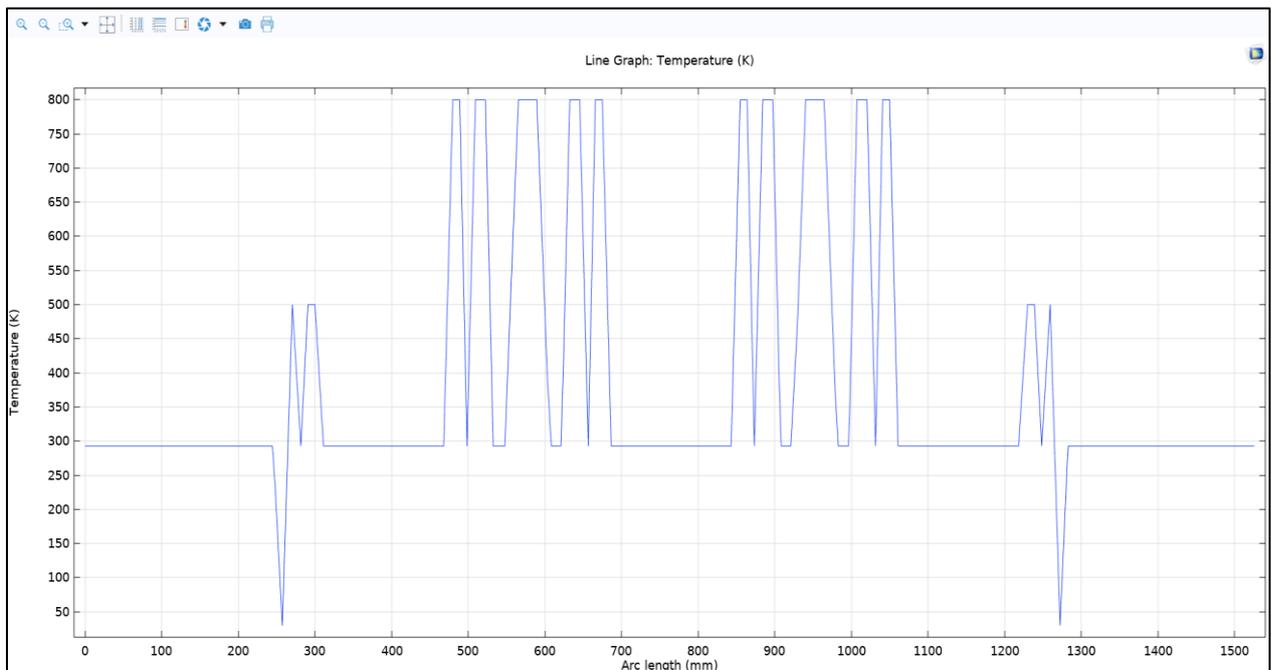


Figure III.11 Courbe de la variation de température dans différentes zones du transformateur le long de la ligne rouge de figure (III.8).

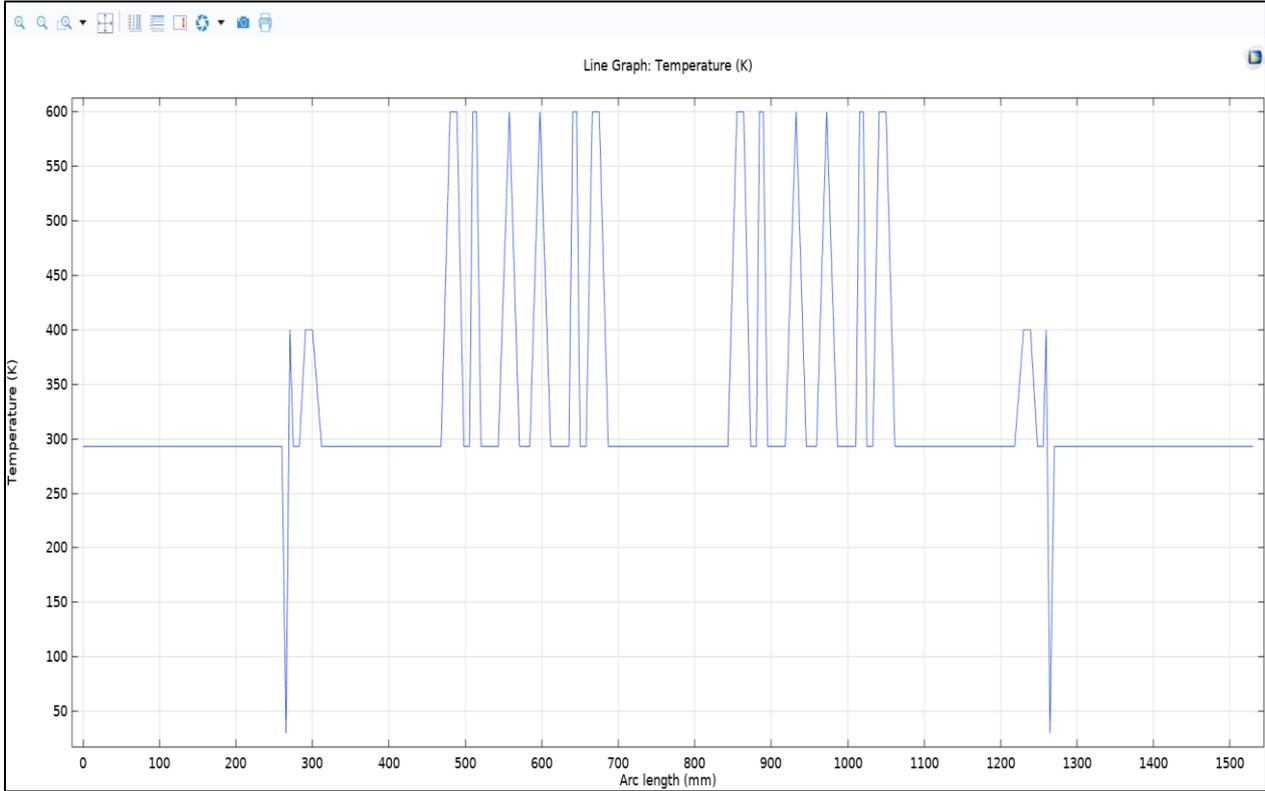


Figure III.12 Courbe de la variation de température dans différentes zones du transformateur le long de la ligne rouge de figure (III.9).

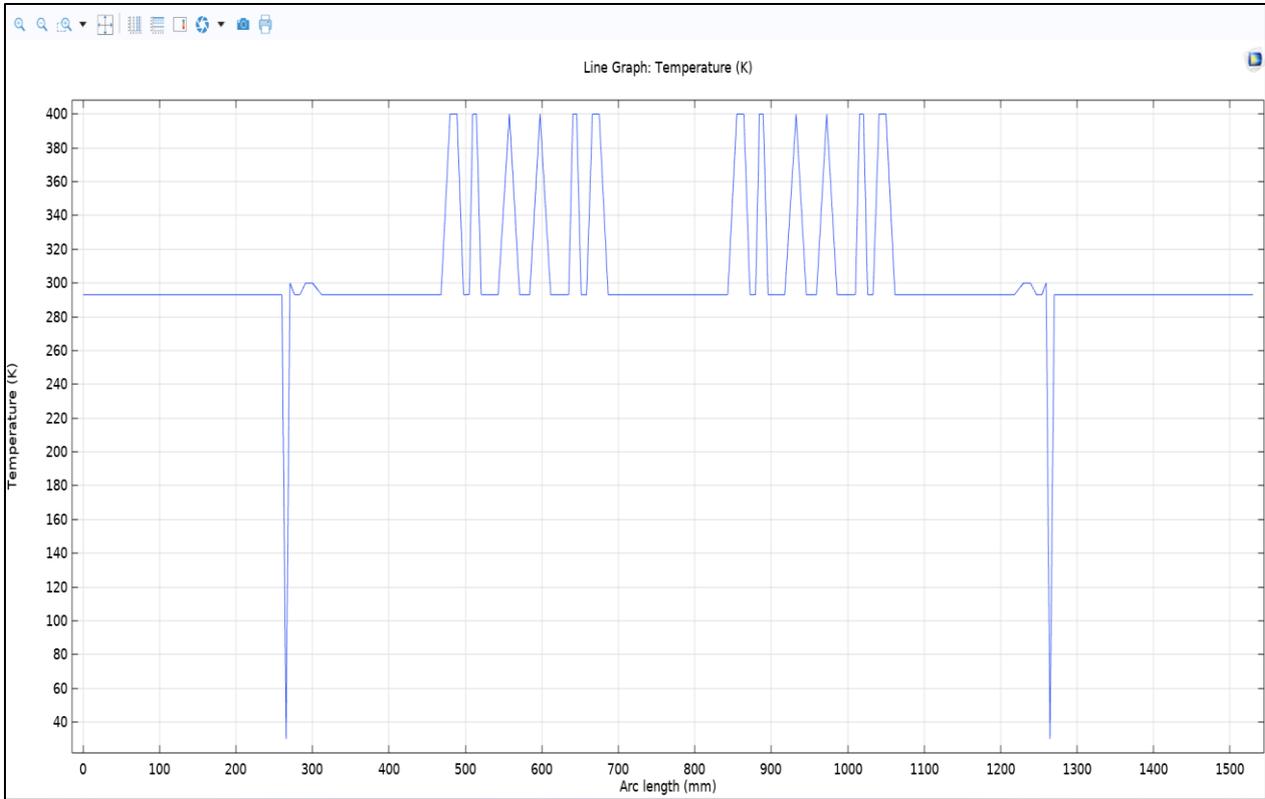


Figure III.13 Courbe de la variation de température dans différentes zones du transformateur le long de la ligne rouge de figure (III.10).

➤ Observation

Nous observons sur les figures (III.11), (III.12) et (III.13) l'effet du changement de l'épaisseur de l'isolant en fibre de verre sur la température des parties du transformateur, en particulier les deux bobines HT et BT, où nous remarquons que la diminution de l'épaisseur de l'isolation conduit à une diminution de la température des deux bobines, ce qui conduit à une augmentation de la température du reste des parties entourant les bobines, c'est-à-dire le noyau de fer et l'isolation.

III.5.4 Impact combiné de la modification de l'épaisseur de l'isolant et des pertes volumiques sur la répartition de la température dans le transformateur

- Prenons le cas du point nominal, en tenant compte des pertes par effet Joule et des pertes fer.
- On calcule les nouvelles pertes Joule volumétriques dans les bobines (HT et BT) en fonction des nouveaux volumes des bobines, ce qui entraîne des résistances mises à jour.
- **Premier calcul :**

Transformateur avec : $h_{(\text{convections})}=150 \text{ (W/m}^2\text{K}^\circ)$, épaisseur de l'isolant $d=0.013 \text{ m}$.

Détermination des pertes volumiques :

1. La bobine BT :

On a : $h_1=1.1 \text{ m}$, $L=0.43 \text{ m}$, $l=0.023 \text{ m}$, $I_{BT}=909 \text{ A}$, $R_{BT}=2.71 * 10^{-3} \Omega$

2. La bobine HT :

On a : $L=0.444 \text{ m}$, $l=0.0475 \text{ m}$, $I_{HT}=12.12 \text{ A}$, $R_{HT}=17,33 \Omega$

Tableau III.5 Les nouvelles valeurs des pertes au niveau des bobines HT et BT ($d=0.013\text{m}$).

Les bobines	Nouvelles valeurs des pertes (w/m^3)
BT	85859.950927782
HT	42778.900465188

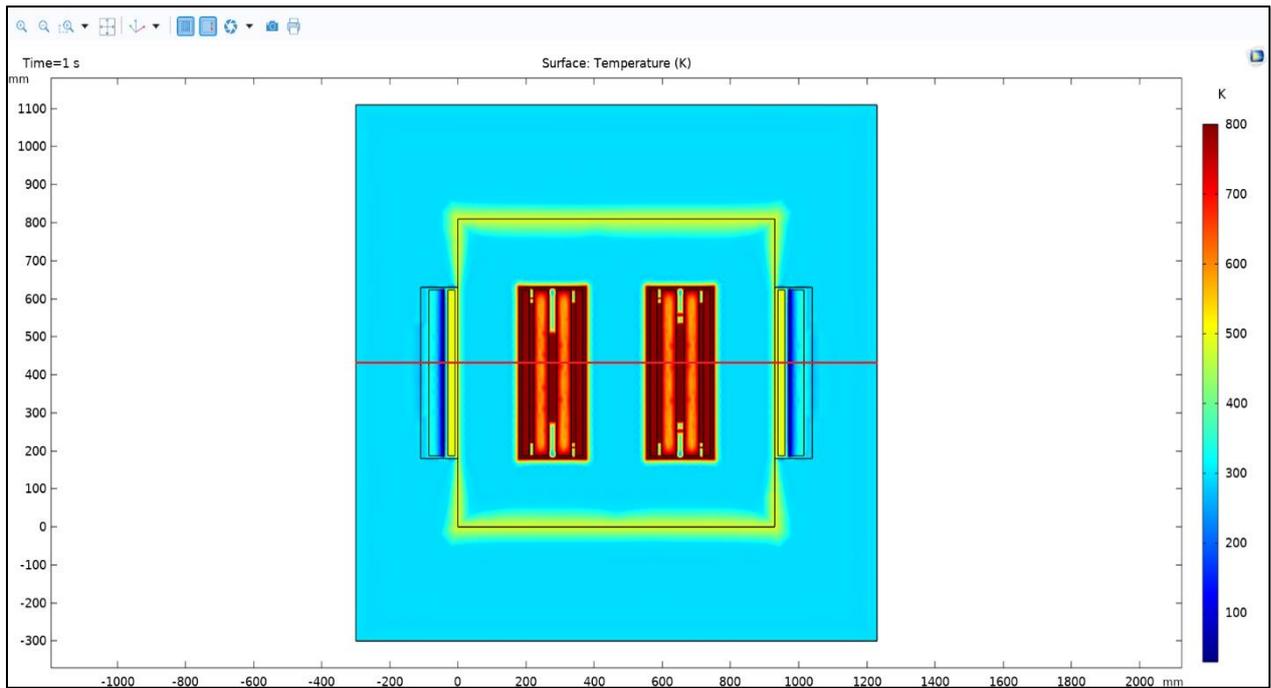


Figure III.14 Répartition de température dans le transformateur d=0.013m avec des pertes variables

➤ **2^{ème} Calcul :**

Transformateur avec : $h_{(convections)}=150 \text{ (W/m}^2\text{K}^\circ)$, épaisseur de l'isolant d=0.009 m.

Détermination des pertes volumiques :

1. La bobine BT :

On a : $h_1 = 1.1 \text{ m}$, $L = 0.432 \text{ m}$, $l = 0.0243 \text{ m}$, $I_{BT} = 909 \text{ A}$, $R_{BT} = 2.71 * 10^{-3} \Omega$

2. La bobine HT :

On a : $L = 0.44 \text{ m}$, $l = 0.0508 \text{ m}$, $I_{HT} = 12.12 \text{ A}$, $R_{HT} = 17,33 \Omega$

Tableau III.6 Les nouvelles valeurs des pertes au niveau des bobines HT et BT (d=0.009 m).

Les bobines	Nouvelles valeurs des pertes (w/m^3)
BT	80657.92465
HT	41064.28644

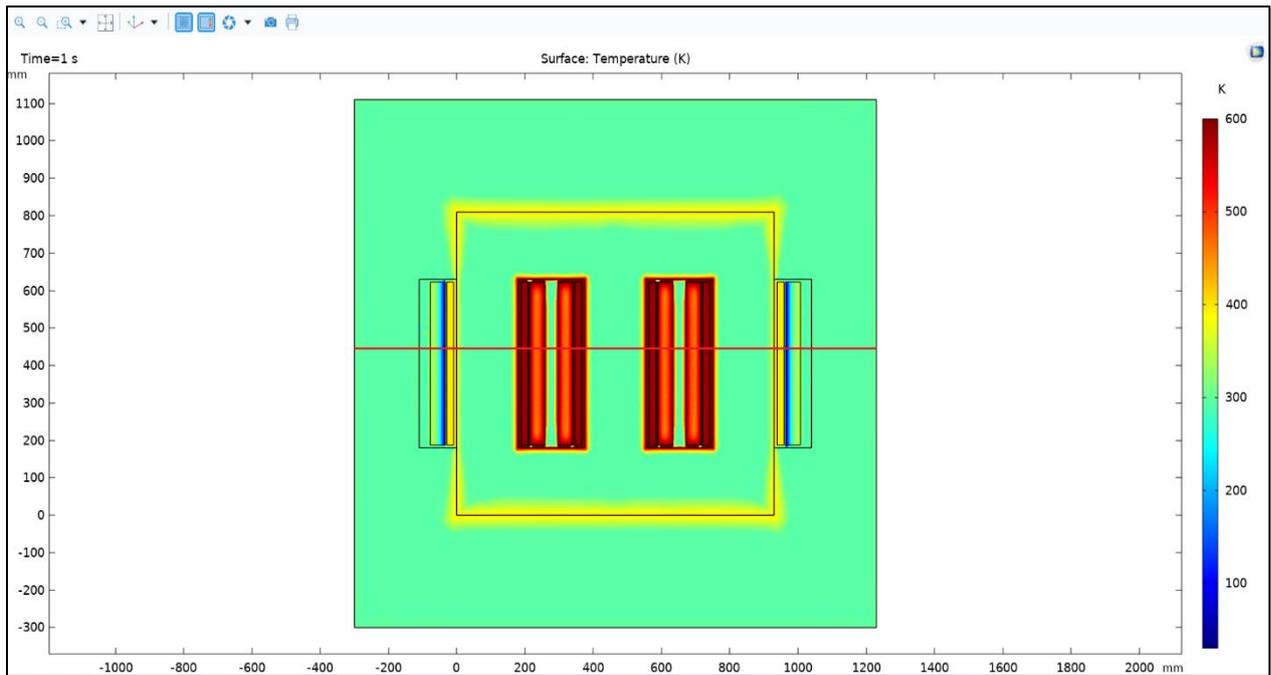


Figure III.15 Répartition de température dans le transformateur $d=0.009\text{m}$ avec des pertes variables.

➤ **3^{ème} Calcul :**

Transformateur avec : $h_{(\text{convections})}=150 \text{ (W/m}^2\text{K}^\circ)$, épaisseur de l'isolant $d=0.005 \text{ m}$.

Détermination des pertes volumiques :

1. La bobine BT :

On a : $h_1 = 1.1 \text{ m}$, $L = 0.44 \text{ m}$, $l = 0.0276 \text{ m}$, $I_{BT} = 909 \text{ A}$, $R_{BT} = 2.71 * 10^{-3} \Omega$

2. La bobine HT :

On a : $L = 0.44 \text{ m}$, $l = 0.0574 \text{ m}$, $I_{HT} = 12.12 \text{ A}$, $R_{HT} = 17, 33 \Omega$

Tableau III.7 Les nouvelles valeurs des pertes au niveau des bobines HT et BT ($d=0.005$).

Les bobines	Nouvelles valeurs des pertes (w/m^3)
BT	69971.58585
HT	35682.19226

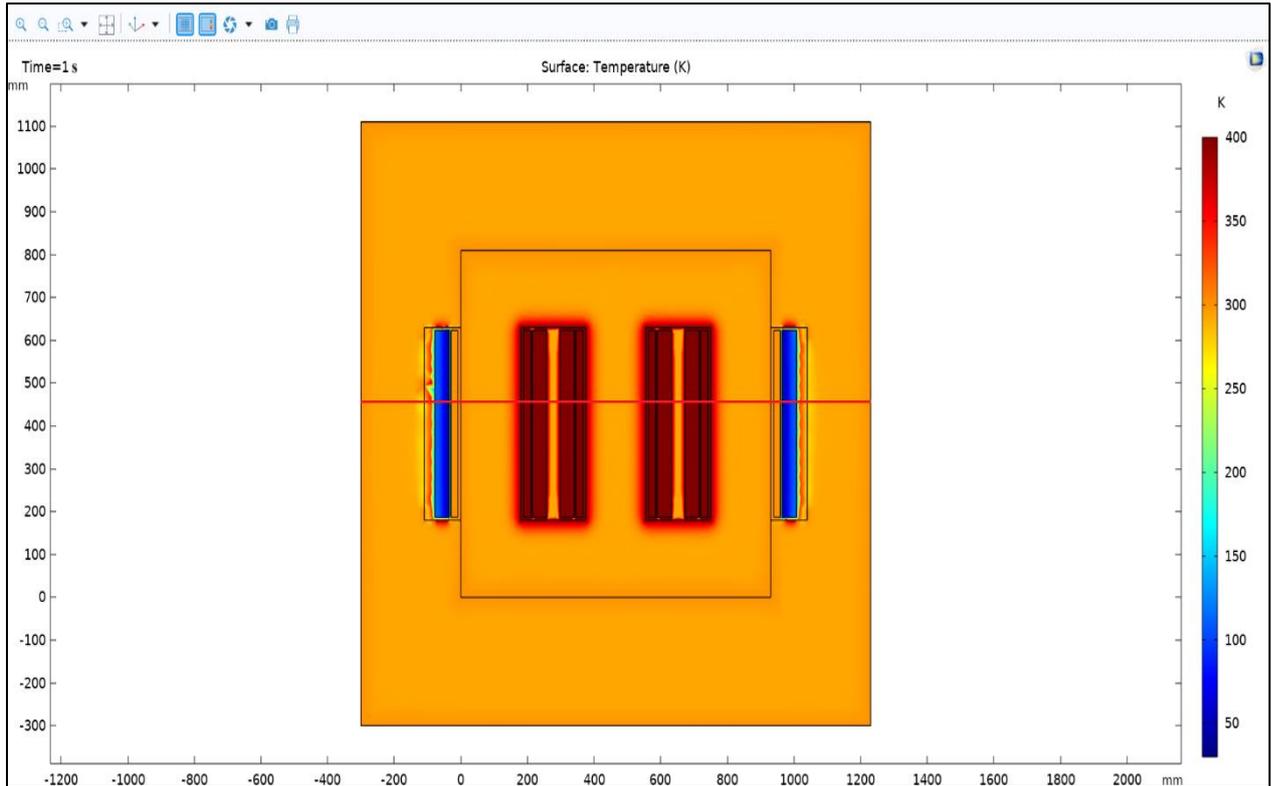


Figure III.16 Répartition de température dans le transformateur $d=0.005\text{m}$ avec des pertes variables.

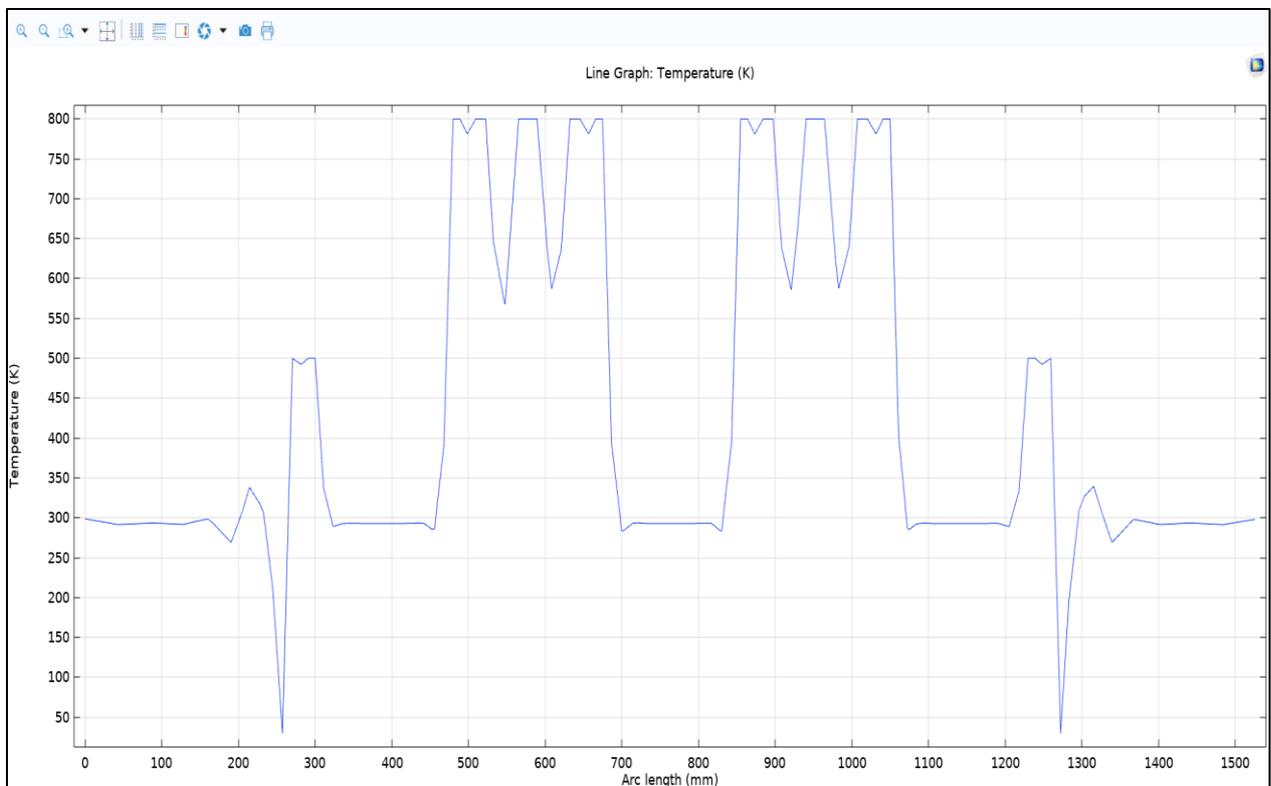


Figure III.17 Courbes de la variation de la température le long de la ligne soulignée en rouge sur la figure (III.14).

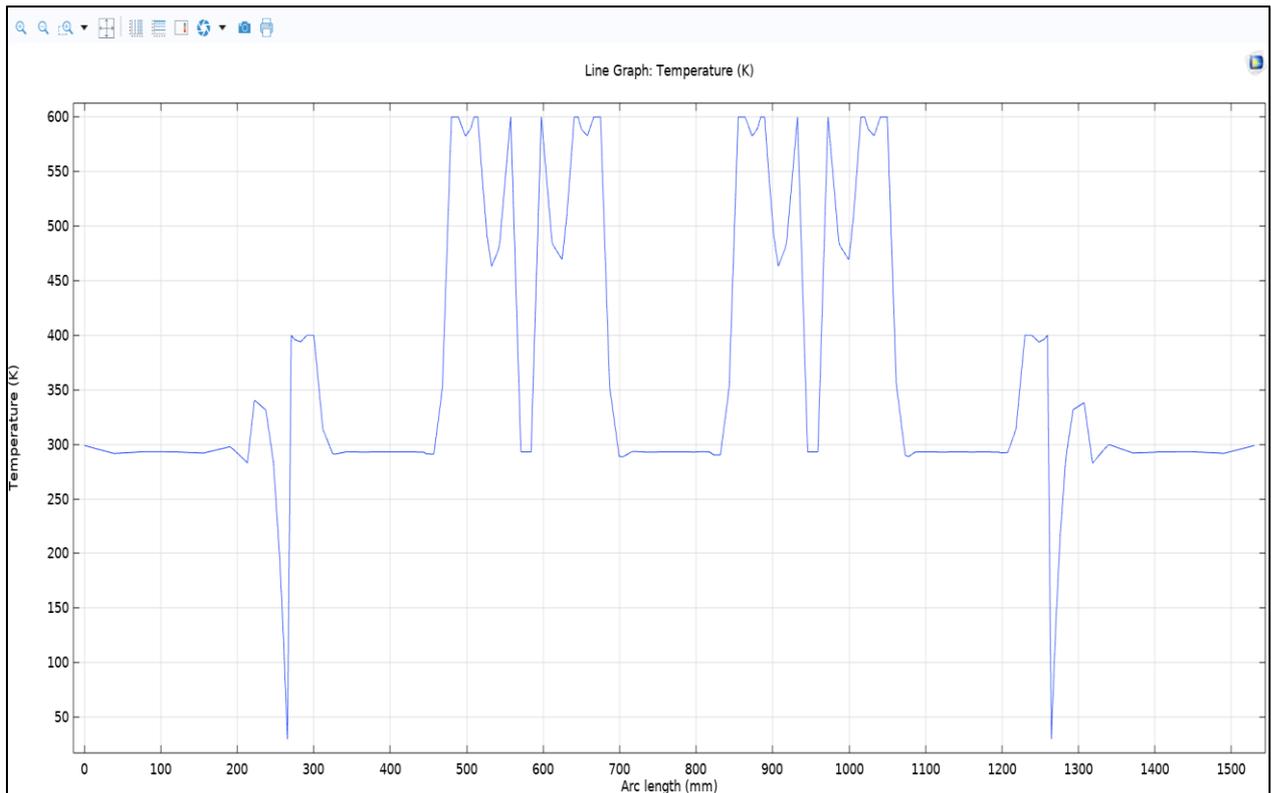


Figure III.18 Courbes de la variation de la température le long de la ligne soulignée en rouge sur la figure (III.15).

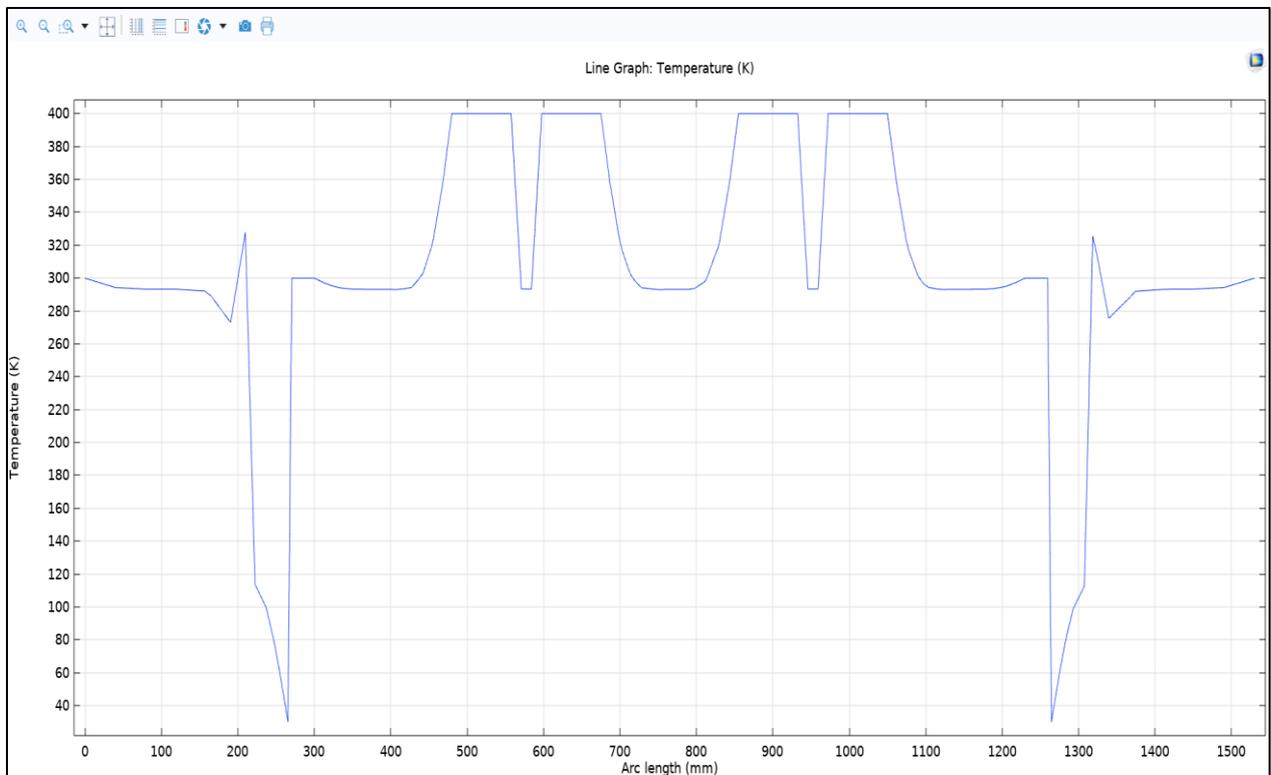


Figure III.19 Courbes de la variation de la température le long de la ligne soulignée en rouge sur la figure (III.16).

➤ Résultat

Après avoir réalisé trois calculs en changeant l'épaisseur de l'isolation en verre ($d=0.013$ m, $d=0.009$ m et $d=0.005$ m) et en augmentant la taille des bobines (HT et BT) tout en maintenant les mêmes dimensions du noyau de fer, ce qui conduit à une diminution des pertes joules par rapport au premier cas, nous concluons, grâce aux résultats obtenus, qu'il existe une relation entre l'épaisseur de l'isolation et la température, c'est-à-dire que lorsque l'épaisseur de l'isolation diminue, la température des bobines de cuivre diminue également, ce qui conduit à une diminution des pertes de volume et, par conséquent, à une diminution de la température dans les différentes parties du transformateur.

III.5.5 la variation de la température en fonction du temps dans différents zone de transformateur

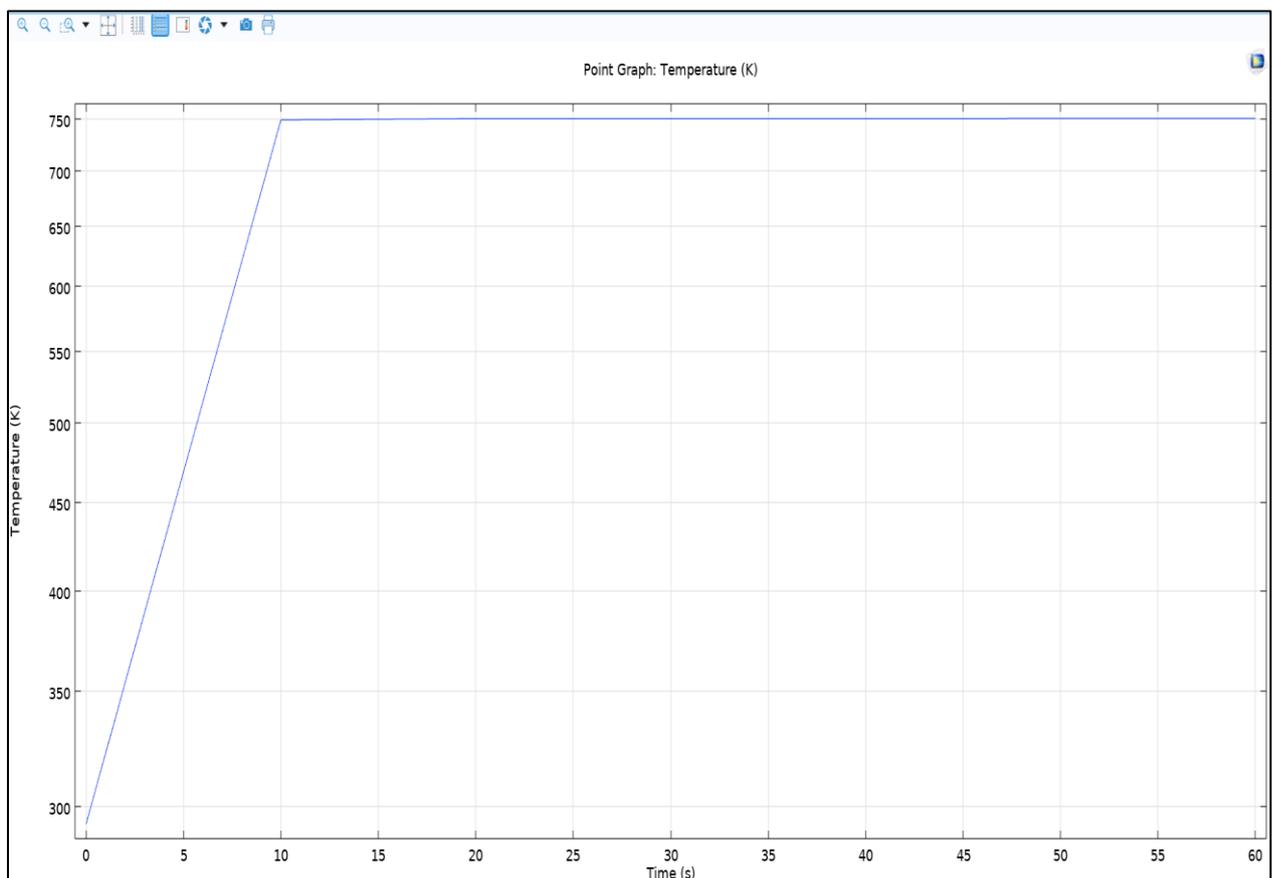


Figure III.20 Courbe de la variation de la température en fonction du temps à un point d'air.

La figure III.20 montre une augmentation de la température de l'air autour du transformateur en raison de l'augmentation du flux thermique au fil du temps.

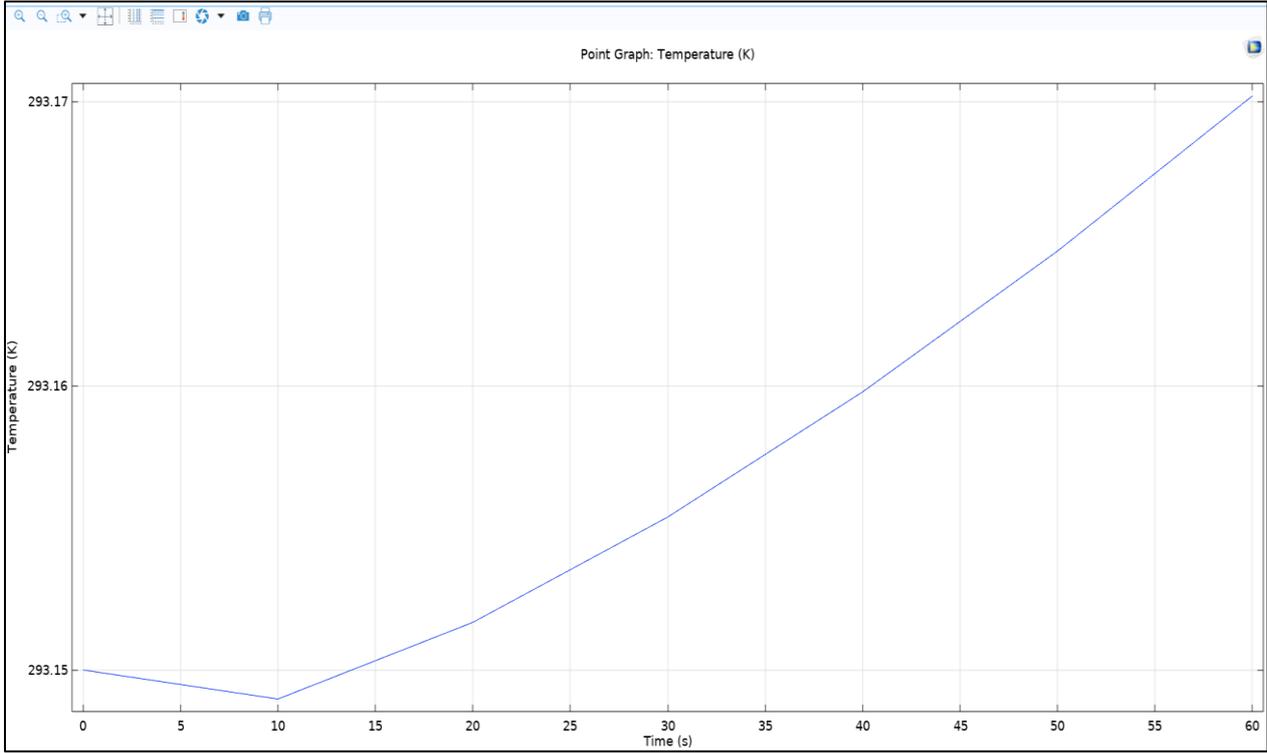


Figure III.21 Courbe de la variation de la température en fonction du temps à un point d'isolateur

La figure III.21 montre une légère augmentation de la température de l'isolation entre les bobines causée par les charges thermiques des bobines.

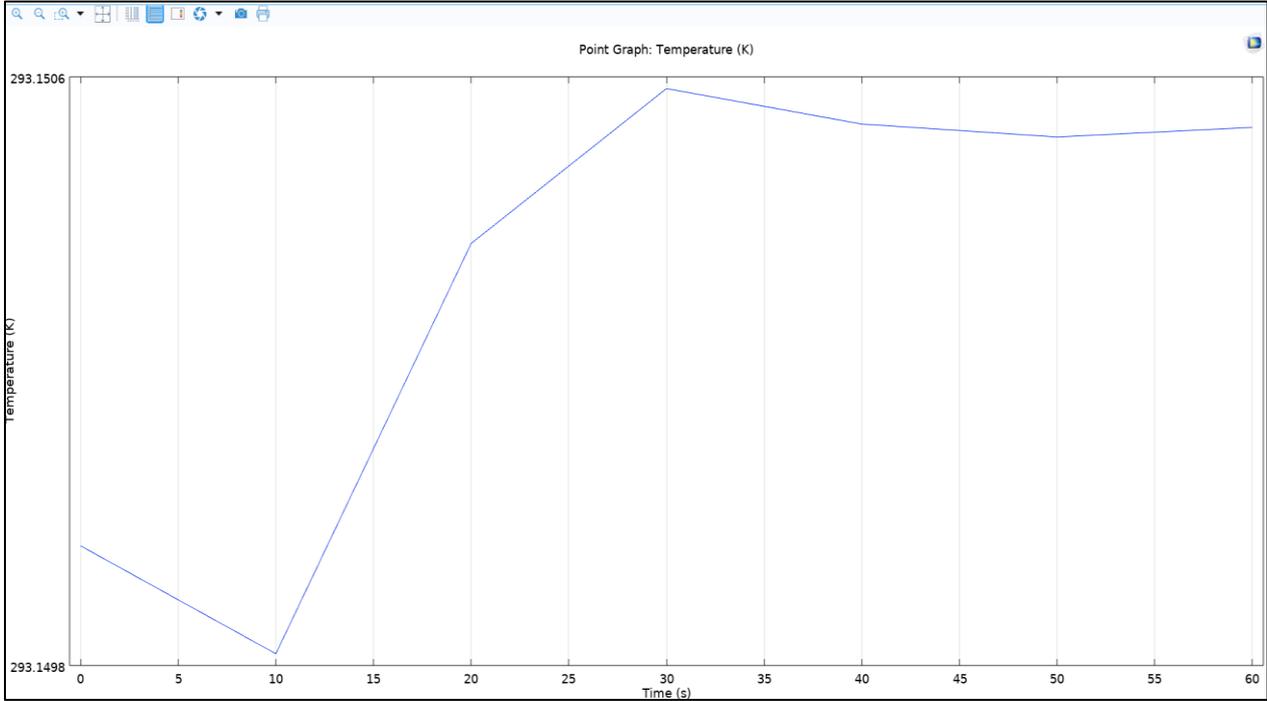


Figure III.22 Courbe de la variation de la température en fonction du temps à un point de noyau.

Chapitre III : Etude du comportement thermique d'un transformateur triphasé

La figure III.22 montre une légère augmentation de la température dans le temps avec des pertes de noyaux de fer.

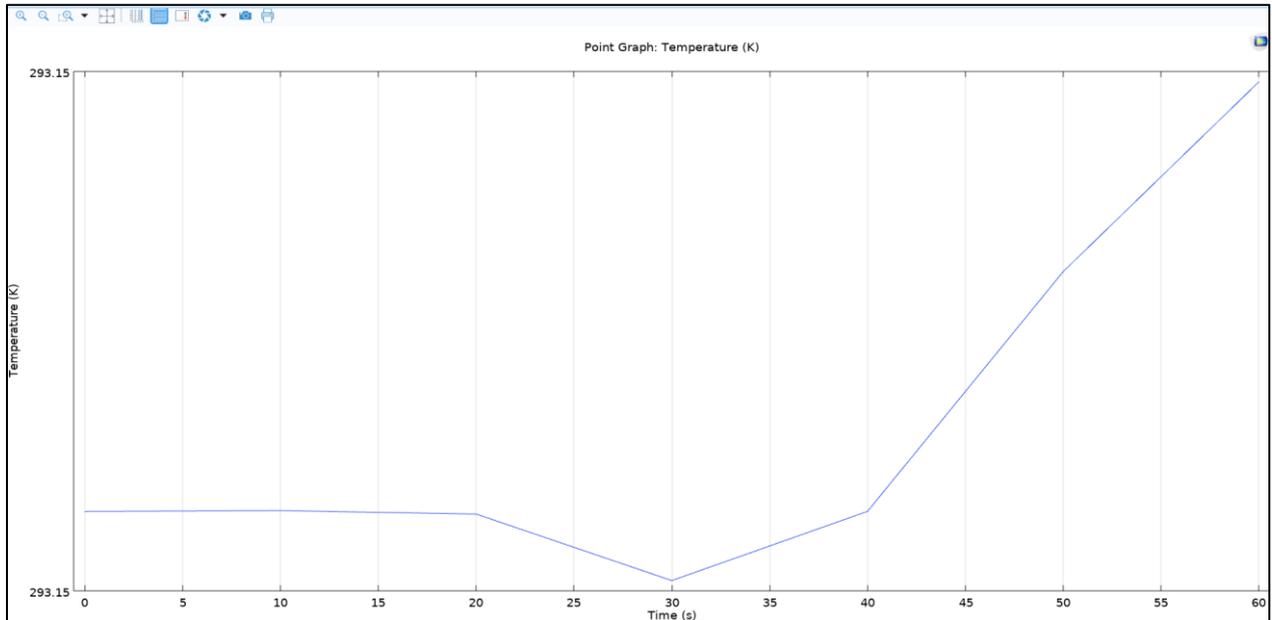


Figure III.23 Courbe de la variation de la température en fonction du temps à un point de bobine HT.

La figure III.23 montre que la température augmente en raison de l'accroissement de la perte de cuivre de la bobine HT et de la convection au fil du temps.

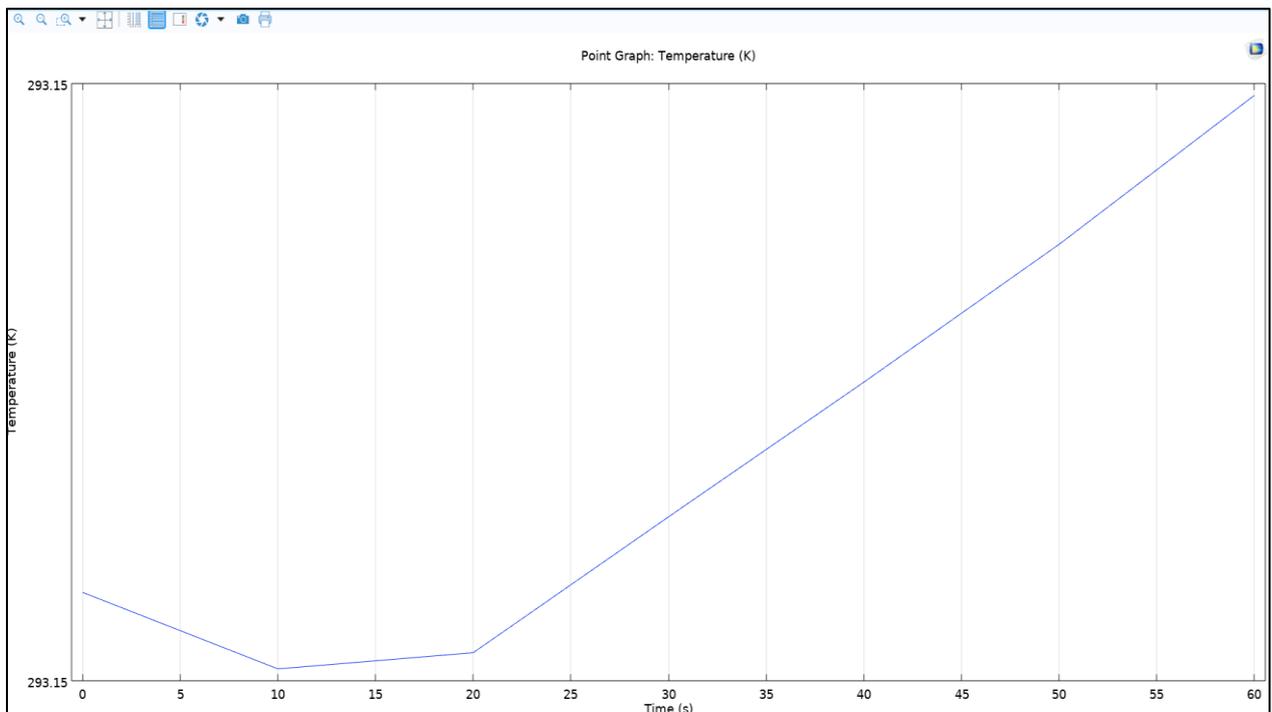


Figure III.24 Courbe de la variation de la température en fonction du temps à un point de bobine BT.

Chapitre III : Etude du comportement thermique d'un transformateur triphasé

La figure III.24 montre que la température augmente en raison de l'accroissement de la perte de cuivre de la bobine BT et de la convection au fil du temps.

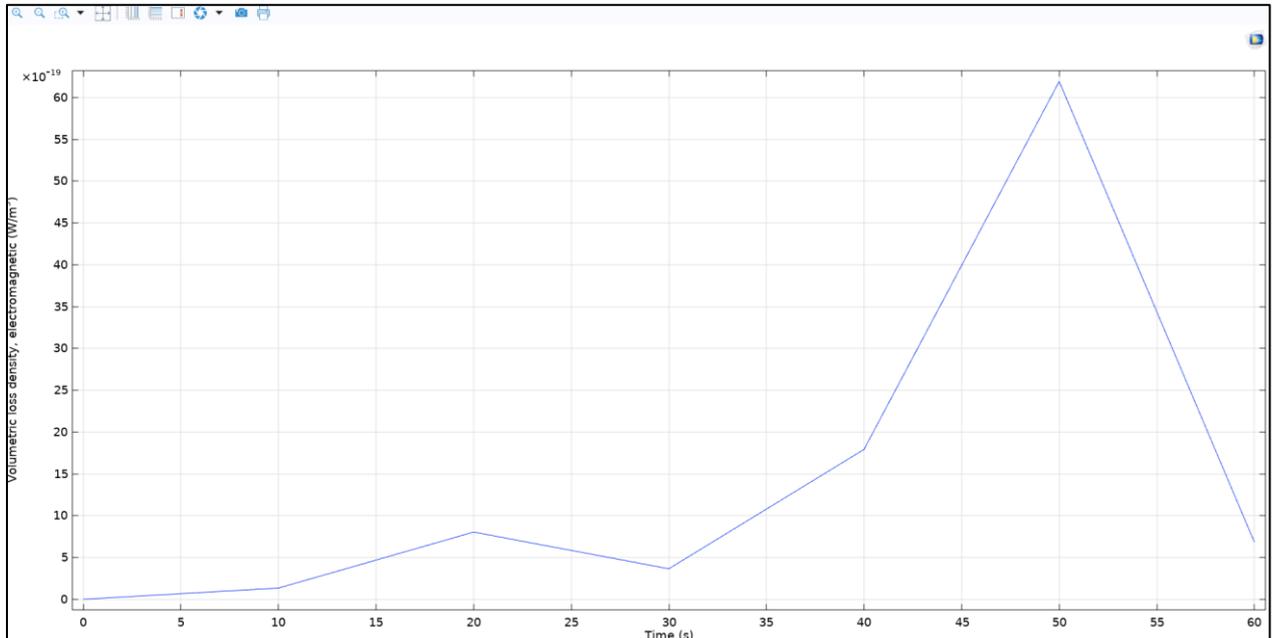


Figure III.25 Densité des pertes Joule volumiques en fonction du temps de bobine HT.

La figure III.25 montre l'évolution des pertes Joule volumiques dans la bobine HT en fonction du temps.

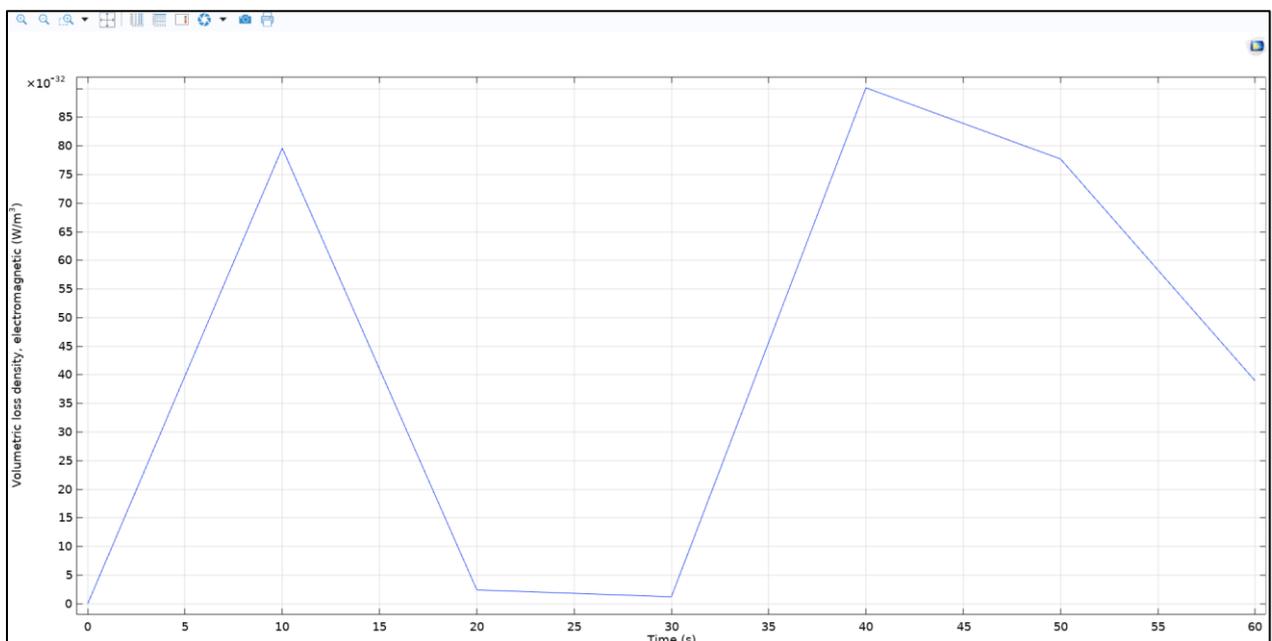


Figure III.26 Densité des pertes Joule volumiques en fonction du temps de bobine BT.

La figure III.26 montre l'évolution des pertes Joule volumiques dans la bobine BT en fonction du temps.

➤ Résultats :

Après avoir étudié le comportement thermique d'un transformateur triphasé, nous avons conclu que :

- Avec l'augmentation des pertes par effet Joule, la température des enroulements HT et BT augmente, ce qui entraîne une augmentation de la température des isolants et, par conséquent, leur détérioration.
- Lorsque les pertes dans le fer augmentent, la température du noyau de fer augmente, ce qui peut entraîner des dommages à la structure du transformateur.
- Enfin, une exposition continue à des températures élevées peut provoquer la détérioration des parties internes du transformateur, réduisant ainsi sa durée de vie. Par conséquent, en surveillant et en anticipant les évolutions thermiques, des mesures peuvent être prises pour maintenir la température de fonctionnement dans une plage de sécurité.

III.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le comportement thermique d'un transformateur électrique, en mettant en lumière la relation entre le changement de température, les pertes Joules, les pertes fer et l'effet de l'isolation sur la température des bobines et du noyau de fer.

En analysant un transformateur abaisseur de tension triphasé (30 KV / 400 V) à l'aide de la méthode des éléments finis, nous avons pu prévoir la température dans différentes zones (inaccessibles expérimentalement) du transformateur et dans différentes conditions de fonctionnement. En somme notre étude souligne l'importance de l'épaisseur de l'isolation ainsi que de la gestion thermique dans la conception des transformateurs. En intégrant ces connaissances on peut améliorer la fiabilité et l'efficacité des transformateurs, garantissant ainsi une énergie plus durable et performante pour l'avenir.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Les transformateurs jouent un rôle crucial dans les industries en tant qu'équipements névralgiques. Ils permettent de modifier les niveaux de tension électrique pour répondre aux besoins spécifiques des différentes machines et processus industriels, assurant ainsi une distribution efficace et sûre de l'énergie. En réduisant les pertes énergétiques et en améliorant la stabilité du réseau électrique, les transformateurs contribuent à l'optimisation des performances industrielles. Leur fiabilité et leur capacité à supporter des charges variées sont essentielles pour maintenir la continuité des opérations et prévenir les interruptions coûteuses. En somme, les transformateurs sont indispensables au bon fonctionnement et à l'efficacité des infrastructures industrielles modernes.

L'étude du comportement thermique d'un transformateur électrique permet d'analyser les mécanismes de transfert de chaleur et d'identifier les zones critiques susceptibles d'être soumises à une surchauffe. Les modélisations et simulations réalisées permettent d'améliorer la compréhension des phénomènes thermiques internes et de proposer des solutions de refroidissement optimales.

Notre étude est basée sur un modèle de transformateur triphasé abaisseur à la tension (30 KV / 400 V) fabriqué par Electro-industrie TIZI-OUZOU.

Les pertes de fer et de joule qui se produisent à l'intérieur du transformateur sont affectées par la température élevée dans la plupart des parties du transformateur, ce qui entraîne la production de chaleur qui se traduit par un phénomène d'échauffement qui, s'il n'est pas correctement contrôlé, peut entraîner une réduction du matériau isolant, ce qui conduit à l'apparition de dysfonctionnements du transformateur.

L'étude du modèle électromagnétique permet d'identifier les pertes en cuivre et en fer, ce qui nous aide à évaluer les performances du transformateur électrique et à améliorer sa conception pour qu'il soit plus efficace, quant au modèle thermique, sur lequel nous nous sommes concentrés plus précisément dans cette note, il permet de déterminer la distribution des températures à l'intérieur du transformateur et donc d'identifier les points chauds et exposés à une augmentation excessive de la température qui peut conduire à réduire l'épaisseur des matériaux isolants ou à endommager l'une des parties du transformateur électrique, et donc ce modèle contribue à la conception de systèmes de refroidissement efficaces pour le transformateur et à l'amélioration de son efficacité.

L'étude analytique a été basée sur le logiciel COMSOL Multiphysics avec le modèle géométrique du transformateur utilisant le logiciel SolidWorks, où nous avons utilisé la méthode des éléments finis pour déterminer les résultats expérimentaux, ce qui nous aide à

Conclusion générale

prédire des résultats réalistes tels que l'augmentation de la température des bobines de cuivre conduit à une augmentation de la température des isolateurs qui affecte leur épaisseur, il est important de pouvoir choisir l'épaisseur d'isolation la plus appropriée sans augmenter.

Enfin, il convient de noter que le développement de ce modèle est basé sur la combinaison de tests électromagnétiques et thermiques afin d'étudier et de comparer ces tests expérimentaux (simulations) avec des tests réels pour optimiser l'efficacité des transformateurs électriques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M. KOSTENKO & L. PIOTROVSKI : *"Machines électriques"*, Tome I, Editions MIR, Moscou, 1976.
- [2] D. MEDJOUTI, *Dimensionnement et réalisation d'un transformateur triphasé hermétique de puissance 400 kVA – 30 kV/400 V*, Mémoire de Master Professionnel soutenu à l'Univ de TIZI-OUZOU, 2014.
- [3] B. DHAHBI, *Diagnostic des Défaits du Transformateur de Puissance*, Mémoire de fin de Formation MSP, 2018.
- [4] N. KASMI & A. MESBAHI, *Étude du comportement du transformateur de puissance en régime impulsionnel*, Mémoire de Master Académique soutenu à l'Univ de TIZI-OUZOU, 2014.
- [5] A. BENEDDINE & F. BEN MAMER, *Étude des essais normalisés des transformateurs de puissance MT/BT*, Mémoire de Master Professionnel soutenu à l'Univ de TIZI-OUZOU, 2016.
- [6] A. BOUDISSA & B. AKLIOUAT & L. BELLAHSENE, *Étude et réalisation d'un transformateur triphasé à trois enroulements 1250 kVA 30 kV/690 V/690 V immergé dans l'huile*, Mémoire de Fin d'Études, Université de TIZI OUZOU, 2008.
- [7] T. KHELLAL & A. TALANTIKIT, *Simulation numérique du comportement thermique d'un transformateur triphasé*, Mémoire de Master, Université de BEJAIA, 2022.
- [8] A. Abdelkebir & N. Saadi, *Application de la Logique Floue pour le Diagnostic des Transformateurs de Puissance par Analyse des Gaz dissous*, Mémoire de Master, Université de BOUMERDES, 2017.
- [9] <https://illustrationprize.com/fr/691-types-of-transformer.html>
- [10] M. ZELLAGUI, *Chapitre 4 Protection Transformateur de Puissance*, Formation des Cadres Techniques Centre de Recherche et de Développement de l'Électricité et du Gaz, Centre de Formation Ain M'Lila.
- [11] http://transformateur-2.over-blog.com/pages/Les_transformateurs-4384669.html
- [12] Edgar. Gillon « *cours d'électrotechnique* », première partie. Librairie Unversitaire-Louvan (BELGIQUE), 1968.
- [13] L. PASTOURIAUX & A. VAROQUAUX, *Electricité industrielle ; Machine Électriques*, Paris Librairie, 1965.
- [14] <https://www.lstransformer.com/fr/News/causes-of-transformer-heating-a-detailed-explanation>.
- [15] A. Lounis & I. Seggar, *Impact du changement de l'épaisseur de la tôle magnétique sur le dimensionnement d'un transformateur triphasé 630 kVA – 30 kV/ 400 V*, Mémoire de Master Professionnel Université de TIZI-OUZOU, 2012-2013.

Références bibliographiques

- [16] <https://www.zenithar.net/fr/introduction-des-types-de-transformateurs-de-chargement-et-de-refroidissement-thermiques/>
- [17] Jean Sanchez, *Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance*, Mémoire de Doctorat université de GRENOBLE, 2011.
- [18] CHAPITRE III – *Exploitation des réseaux électriques*, Génie électrique, Université Moulay Ismail.
- [19] A. BERFAS & M. NEKACHE, *calcul et exploitation d'un transformateur triphasé de puissance 25/30 MVA -30KV/5.875KV*, Mémoire de fin d'études ingénieurs d'état en Électrotechnique, Université de TIZI-OUZOU, 2010.
- [20] M. ZELLAGUI, *Étude protection des réseaux électriques mt 30& 10 kv*, Mémoire de Magister Université de Constantine, 2010.
- [21] <https://fr.grote.com/technical-tips/fuse-circuit-protection-technical-tips/>
- [22] Chapitre V, *Transformateur triphasé*, PDF.
- [23] S. CHAOUCH, *CHAPITRE I : Transformateurs Monophasé et Triphasé*, PDF.
- [24] S. CHARI, *Le transformateur triphasé*, PDF.
- [25] <https://www.schoolmouv.fr/definitions/transfert-thermique/definition>.
- [26] <https://www.superprof.fr/ressources/physique-chimie/physique-chimie-terminale-s/transfets-thermiques.html>.
- [27] R. BAKRI, *Modélisation thermique des composants magnétiques planar pour l'électronique de puissance*, Thèse de doctorat, Université de Lille Nord de France, 2018.
- [28] <https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/documents-dinformation/les-transferts-de-chaaleur>.
- [29] Y. A. Çengel, *Heat Transfer: A Practical Approach*, 2nd ed. Boston: McGraw-Hill, 2003.
- [30] S. Ely Ahmed, *Etude et modélisation des systèmes de refroidissement*, Mémoire de Master en Électromécanique, Université Mohamed Seddik Ben Yahia – Jijel, 2021.
- [31] A. FOURMIGUE, *Méthodes de calcul numérique pour la simulation thermique des circuits intégrés*, Thèse de Doctorat génie informatique, Université de Montréal, 2014.
- [32] M. MANSOURI, *Modélisation par Éléments Finis d'un Problème Thermique Linéaire et Non Linéaire*, Mémoire de Master, Centre Universitaire de NAAMA, 2017.
- [33] S. DJEMOUI, *Couplage Electromagnétique Thermique par l'approche intégrale PEEC, Etude et application pour les dispositifs à induction*, Doctorat LMD, Université Mohammed Seddik BENYAHIA – Jijel, 2022.
- [34] M.A. IKHEDJI, *Calcul thermique d'un transformateur monophasé*, Mémoire de Master, Université A. MIRA-BEJAIA, 2020/2021.

Références bibliographiques

- [35] M.N. BARGACH & M. BOUKALOUCHE, *CHAPITRE 1 Définitions et Introduction aux Transferts Thermiques*, cours physique, 2005-2006.
- [36] H. CHAABANE, *La diffusion thermique*, cours physique, 2010.
- [37] https://fr.m.wikiversity.org/wiki/Conduction_thermique/%C3%89quation_de_la_chaleur.
- [38] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Transfert-thermique-page-3.html>.
- [39] ‘*Les principes de la thermique*’ bâtiments thermique PDF.
- [40] O. ALOUACHE & M.N. MERABET, *Etude et Modélisation des Systèmes de Refroidissements des Transformateurs*, Mémoire de Master, Université Mohamed Seddik Ben Yahia – Jijel, 2020.
- [41] S. CHEBAANI, *Modélisation Thermique d’Un Transformateur Utilisant Un Matériau Composite Fer-Résine*, Mémoire de Magistère, Université de Batna, 2011/2012.
- [42] <https://www.usinenouvelle.com/expo/suite-logicielle-pour-la-simulation-mult-p315547240.html>.
- [43] O. KESBI & Y. DADDIOUAMEUR, *Simulation Numérique des Contraintes Électrique et Électromécanique dans les Cavités des Câbles HT*, Mémoire de Master, Université de Ghardaïa, 2019/2020.
- [44] https://www.engineeringtoolbox.com/amp/air-properties-viscosity-conductivity-heat-capacity-d_1509.html.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Faculté des sciences et Technologies

Département d'automatique et

d'électromécanique



Université de Ghardaïa

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم الآلية والكهروميكانيك

غرداية في: 15/01/2022

إذن بالطباعة (مذكرة ماستر)

بعد الاطلاع على التصحيحات المطلوبة على محتوى المذكرة المنجزة من طرف الطلبة التالية أسماؤهم:

1. الطالب (ة): **بامزوزي صهيبي**

2. الطالب (ة): **كروحي عبد السلام**

تخصص: **آلية وأتمتة**

نمنح نحن أعضاء لجنة المناقشة:

الإمضاء	الصفة	المؤسسة الأصلية	الرتبة	الإسم واللقب
	الممتحن 1	جامعة غرداية	MCB	أ. لية أودينة بلخير
	الممتحن 2	جامعة غرداية	MCB	أ. مصباح سعيد
	المؤطر	جامعة الخواطر	MAB	أ. حشاتي كلوم
	رئيس اللجنة	جامعة غرداية	Professor	أ. بشوان محسن

الإذن بطباعة النسخة النهائية لمذكرة الماستر الموسومة بعنوان:

Etude de Comportement thermique
d'un Transformateur triphasé

إمضاء رئيس القسم

العلمي عبد اللطيف
رئيس قسم الآلية
و الكهروميكانيك

