



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique



جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département : Maintenance en Electromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electromécanique


Spécialité : Electromécanique industrielle

Thème :

Amélioration du refroidissement d'un transformateur par utilisation d'un nano-fluide

Présenté et soutenu publiquement par :

 Kermous Abdelhalim

 Mezouar Abdelbassit

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
B.nourdine	Examineur
B.Blkacem	Encadreur
M.Abbed	Président

Remerciement

*Louange à Allah, qui nous a guidés dans la bonne voie tout au long de notre vie et nous a aidés à accomplir ce humble travail. Nous exprimons notre profonde gratitude envers notre encadreur, le professeur **balkacem balkacem**, qui a été présent et très actif tout au long de ce projet, n'hésitant pas à consacrer son temps pour nous aider, depuis le début jusqu'à la rédaction du mémoire.*

Nous tenons à remercier chaleureusement tous les enseignants de l'Institut de Maintenance et Sécurité Industrielle d'Oran pour leur soutien et leur contribution à notre formation.

Nous exprimons également notre profonde reconnaissance envers notre famille, en particulier nos parents, pour leur soutien constant et leur aide précieuse tout au long de nos études.

Enfin, nous souhaitons exprimer notre gratitude envers toutes les personnes, de près ou de loin, qui ont contribué à rendre ce travail réalisable et présentable. Leur participation a été d'une valeur inestimable et a contribué au succès de notre mémoire.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail Aux être qui me sont les plus chers.

*À mes chers parents qui m'ont toujours encouragé Symbole de tendresse pour leur sacrifice
estimable que dieu garde.*

Et à mes frères et sœurs et à tous mes amis

À Toutes mes collègues de la promotion 2023 d'ELM

Abdelbassit

Je dédie ce modeste travail Aux être qui me sont les plus chers.

*À mes chers à mon mère rbi yrhmha ,Qui a été mon soutien tout au long de mon parcours
académique et m'a toujours encouragée, demande à Dieu Tout-Puissant de la couvrir de Sa
miséricorde et de la faire entrer dans Son Paradis .et à mon père qui a sacrifié la chose la
plus précieuse pour moi*

Et à mes frères et sœurs et à tous mes amis

À Toutes A tous nos amis, le staff administratif et pédagogique du département de ELM

Abdelhalim

Sommaire

Chapitre I

Introduction	1
I.1 introduction	2
I.2 Définition :	2
I.3 Le rôle de transformateur :	3
I.3 Invention	4
I.4 Les types de transformateurs	6
I.4.1 Types de services	6
I.4.1.1 Transformateur de distribution	6
I.4.1.2 Les transformateurs de puissance	7
I.4.1.3 Transformateur de courant	8
I.4.1.4 Transformateur de tension	9
I.4.1.5 Autotransformateur	9
I.4.2 Sur la base de l'offre	10
I.4.2.1 transformateur monophasé	10
I.4.2.2 Transformateur triphasé	10
I.4.3 Selon le type de refroidissement	10
I.4.3.1 Les transformateurs immergent	10
I.4.3.2 Les transformateurs secs :	11
I. 5 Principe de fonctionnement :	11
I.5.1 Schéma équivalent d'un transformateur	12
I.6 Éléments de transformateur	12
I.6.1 Partie active	13
I.6.2 Partie constructive (Circuit électrique)	15
I.7 Isolation	16
I.8 Principaux éléments des transformateurs	16
I.9 Les couplages	17
I.9.1 Mode de couplage	17
I.9.2 Le choix de couplage	19
I.10 Plaque signalétique d'un transformateur	19
I.11 Rapport de transformation :	20

I.12 L'échauffement :	20
I.12.1. Pertes de base ou pertes de fer	21
I.12.2 Perte de cuivre	21
I.12.3 Perte diélectrique	21
I.12.4 Mesurer l'efficacité du transformateur	22
I.13 Systèmes de Refroidissement des Transformateurs	22
I.13.1 Le rôle du système de refroidissement	22
I.13.2 Les types de Refroidissement des transformateurs	23
I.13.2.1 Méthodes de refroidissement du transformateur à sec	24
I.13.2.2 Méthodes de refroidissement du transformateur immergé dans l'huile	24
I.14 conclusion	27

Chapitre II

II.1 Introduction	29
II.2 définition des nano-fluides	29
II.3 Les composants des nano-fluides	30
II.3.1 Types de nanoparticule	32
II.4 Nano-fluides mono-matériau :	32
II.5 Fabrication des nanoparticules et des nano-fluides	33
II.5.1 méthode en une étape (one-step method) :	34
II.5.2 Méthode en deux étapes:	34
II.6 Les propriétés thermo physiques des nano fluides	35
II.6.1 La fraction volumique	35
II.6.2 Conductivité thermique	35
II.6.3 Viscosité dynamique	37
II.6.4 Chaleur spécifique	37
II.6.5 La masse volumique	38
II.6.6 Coefficient d'expansion volumique	39
II.7 Domaines d'application des nano fluides	39
II.7.1 Utilisation des nano fluides dans le domaine du froid	39
II.7.2 Refroidissement des systèmes thermiques	39
II.7.3 Refroidissement des systèmes électroniques	40
II.8 Avantages et inconvénients des nano-fluides	40
II.8 .1 Les avantage de nano fluides	40

II.8.2 Inconvénients des nano-fluides.....	40
II.9 Nano fluide (MWCNTs / huile de transformateur)	41
II.10 Conclusion.....	42

Chapitre III

III.1 Introduction	44
III.2 Les Phénomènes Multiphasique	44
III.2.1 Phénomène électromagnétique	44
III.2.2 Equations de Maxwell [33].....	45
III.2.2.1 Formes intégrales des équations de Maxwell.....	46
III.2.2.2 Equation de maxwell-faraday	47
III.2.2.3 Loi de conservation de flux de l'induction magnétique	47
III.2.2.4 Equation de Maxwell-Ampère	47
III.2.3 Loi d'Ohm généralisé	49
III.2.4 Conditions de passage entre milieux	49
III.2.4.1 Conditions sur les composantes tangentielles	50
III.2.4.2 Conditions sur les composantes normales.....	51
III .2.5 Conditions aux limites naturelles	51
III .2.5.1 Conditions aux limites spatiales et temporelles.....	51
III.2.6 Conditions de Jauge.....	52
III .2.7 Différentes Formulations Electromagnétiques.....	52
II .2.7.1 Phénomène Electrostatique	53
II .2.7.2 Formulation du modèle magnétostatique	54
II .2.7.3 Formulation du modèle magnétodynamique	55
III.3 Modèle Thermique	56
III.3.1 Transfert de chaleur par conduction	57
III.3.2 Transfert de chaleur par convection	58
III.3.3 Transfert de chaleur par rayonnement.....	59
III.4 Analogique thermique/électrique	60
III .4.1 Couplage Electromagnétique et Thermique.....	60
III .4.2 Bilan énergétique équation de diffusion de chaleur	60
III.5 Dynamique des Fluides	61
III.5.1 Equations de Navier-stocks	61
III.6 Méthodes de Résolution	62

III.6.1 Méthode des Eléments Finis (MEF)	62
III.6.2 Etapes de la méthode des éléments finis	63
III.7.Présentation de Logiciel Comsol Multiphysics	64
III.8 Conclusion	65

Chapitre III

III.1 Introduction :	67
III.2 Modélisation d'un Transformateur de Puissance	67
III.2.1 Caractéristiques physiques	70
III.2.2 Discrétisation de la structure	70
III.3 Etude de refroidissement de transformateur de puissance par l'huile Borak 22 : 71	
III.3.1 les caractéristiques de l'huile Boarak 22	72
III.3.2 Résultats et Interprétations	72
III.4 :Etude de refroidissement de transformateur de puissance par nano fluide (MWCNTs/ huile de transformateur):	76
III.4.1 les caractéristiques du nano fluide (MWCNTs/huile de transformateur) :	76
III.4.2 Résultats et Interprétations	76
III.5 Comparaison des performances de refroidissement entre l'huile (Borak 22) et le nanofluide (MCWNTs + huile de transformateur)	80
III.5.1 les pertes totales en fonction de fréquence	80
III.5.2 Les Densités du flux magnétique	81
III.5.3 L'inductance primaire en fonction de la fréquence	83
III.6 Conclusion	84
CONCLUSION	87

Listes des Figures

Chapitre I

Figure I. 1: le rôle de transformateur.....	3
Figure I. 2:Le prototype de transformateur Stanley original de 1885 au Berkshire Museum....	5
Figure I. 3: les types de transformateur	6
Figure I. 4:transformateur de distribution	7
Figure I. 5: Transformateur de puissance.....	8
Figure I. 6 : Transformateur immergé	10
Figure I. 7 : Transformateur sec	11
Figure I. 8 : Principe de fonctionnement d'un transformateur.....	12
Figure I. 9: Schéma équivalent d'un transformateur.....	12
Figure I. 10: Circuit Magnétique d'un transformateur triphasé.....	13
Figure I. 11: Transformateur à colonnes	14
Figure I. 12: Transformateur cuirassé	14
Figure I. 13 : photo des enroulements d'un transformateur triphasé.....	15
Figure I. 14 : Cuve d'un Transformateur triphasé.....	15
Figure I. 15 : coupe d'un transformateur de puissance.....	17
Figure I. 16 : Exemple de plaque d'un transformateur	20
Figure I. 17 : Les types de Refroidissement des transformateurs.....	23
Figure I. 18 : Huile Naturelle à Air Naturel du refroidissement de transformateur	25
Figure I. 19 : Huile Naturelle à Air forcé du refroidissement de transformateur.....	25
Figure I. 20 : Huile forcé à Air forcé du refroidissement de transformateur	26
Figure I. 21 : Huile forcé du refroidissement de transformateur.....	27

Chapitre II

Figure II 1 : nanoparticules dispersées dans le fluide de base.....	30
Figure II 2 : Échelle des dimensions nanométrique [15]	30
Figure II 3 : nanoparticules sphériques [BAN/2005] ;Nanotubes de carbone	32
Figure II 4 : Structures moléculaires du graphite, du diamant et d'un nano-tube de carbone[17]	33
Figure II 5 : Procédé de synthèse de nano-fluide en une seule étape.....	34
Figure II 6 :Processus de préparation en deux étapes du nano fluide.....	35
Figure II 7 : photo microscopie de MWCNTs	42

Chapitre III

Figure III 1 : Surface et volume d'intégration entre deux milieux.....	50
Figure III 2 : Domaine d'étude générique d'un problème magnétodynamique.....	52
Figure III 3 : conduction de la chaleur dans un barreau [38]	57

Figure III 4 : Principe de la convection	58
Figure III 5 : principe de rayonnement.....	59

Chapitre III

Figure III 1 : Transformateur de puissance triphasé	68
Figure III 2 : Phase d'un transformateur à colonnes.....	68
Figure III 3 : Géométrie, modèle 3D	69
Figure III 4 : Modèle axisymétrique d'une phase de transformateur à colonnes [24].....	69
Figure III 5 : Discrétisation par élément finis (maillage utilisé).....	71
Figure III 6 : graphe des pertes totales du transformateur en fonction de la fréquence.....	72
Figure III 7 : graphe de résistance totale du transformateur en fonction de la fréquence.....	73
Figure III 8 : Densité du flux magnétique [T].....	74
Figure III 9 : Inductance du primaire en fonction de la fréquence	75
Figure III 10 : les pertes totales du transformateur en fonction fréquence	77
Figure III 11 : la résistance totale du transformateur en fonction de la fréquence	77
Figure III 12 : Densité du flux magnétique [T].....	78
Figure III 13 : Inductance du primaire en fonction de la fréquence	79
Figure III 14 : les pertes totales en fonction de fréquence	80
Figure III 15 : Densité du flux magnétique [T] de l'huile Borak 22.....	81
Figure III 16 : Densité du flux magnétique [T] de le nano fluide (MWCNTs + huile de transformateur).....	82
Figure III 17 : L'inductance primaire en fonction de la fréquence.....	83

Listes des tableaux

Chapitre II

Tableau II. 1 : Combinaisons nanoparticules/fluides de base [15]	31
--	----

Chapitre III

Tableau III. 1 : Analogies entre la loi de Fourier et la loi d'Ohm [41]	60
Tableau III. 2 : Diagramme de différentes étapes de résolution dans Comsol Multiphasiques	64

Chapitre III

Tableau III. 1 : Caractéristiques du transformateur THT/HT[23]	68
Tableau III. 2 : Dimensions géométriques de modèle	70
Tableau III. 3 : Caractéristiques physiques du transformateur	70
Tableau III. 4 : les caractéristiques depour l'huile (Borak 22) [25].....	72
Tableau III. 5 : les caractéristiques du nano fluide (MWCNTs/huile de transformateur)	76



*Introduction
Générale*

Introduction

Le transformateur est un composant essentiel du système électrique, permettant la conversion et la distribution de l'énergie électrique à travers les réseaux de transmission et de distribution. Le bon fonctionnement du transformateur dépend en grande partie de son système de refroidissement, qui joue un rôle crucial dans la dissipation de la chaleur générée lors de son fonctionnement.

Au fil des années, la demande croissante en énergie électrique et les exigences de plus en plus strictes en matière d'efficacité énergétique ont incité les chercheurs et les ingénieurs à explorer de nouvelles techniques de refroidissement plus efficaces. L'une de ces approches prometteuses est l'utilisation de nano fluide, qui sont des suspensions de nanoparticules dans un fluide de base.

Le présent mémoire de fin d'études se concentre sur l'amélioration du refroidissement des transformateurs en utilisant des nano fluides. Il est divisé en quatre chapitres distincts qui couvrent différents aspects de cette problématique.

Le premier chapitre offre une vue d'ensemble des transformateurs et de leur système de refroidissement. Il aborde les différents types de transformateurs, leurs principales caractéristiques et les méthodes conventionnelles de refroidissement utilisées dans l'industrie. Il met également en évidence les défis rencontrés dans le refroidissement des transformateurs et l'intérêt d'explorer de nouvelles approches telles que l'utilisation des nano fluides.

Le deuxième chapitre se concentre sur les nano fluides. Il présente les concepts de base, les propriétés et les caractéristiques des nano fluides. Il explique également les mécanismes de transfert de chaleur améliorés associés à l'utilisation des nano fluides, ainsi que les avantages et les défis liés à leur utilisation dans le domaine industriel.

Le troisième chapitre aborde la modélisation multiphysique des transformateurs. Il décrit les différentes approches de modélisation utilisées pour étudier le comportement thermique et électromagnétique des transformateurs. Il met l'accent sur l'importance de prendre en compte les interactions multiphysiques dans la modélisation des transformateurs, en particulier lors de l'utilisation de nano fluides comme moyen de refroidissement.

Enfin, le quatrième chapitre présente une application concrète du refroidissement de transformateurs de puissance en utilisant le logiciel de simulation COMSOL. Il décrit la méthodologie utilisée pour simuler le refroidissement d'un transformateur à l'aide de l'huile Borak 22 et d'un nano fluide composé de MWCNTs dispersés dans l'huile de transformateur. Les résultats obtenus sont analysés et discutés pour évaluer l'efficacité du système de refroidissement proposé.

En conclusion, ce mémoire de fin d'études vise à explorer et à améliorer le refroidissement des transformateurs en utilisant des nano fluides. Les différentes étapes de l'étude, de la modélisation à la simulation, fourniront des informations précieuses pour la conception et l'optimisation des systèmes de refroidissement des transformateurs dans le domaine industriel



Chapitre I

*Généralité sur les
transformateurs et leur
refroidissement*

I.1 introduction

Le refroidissement est un aspect crucial pour assurer le bon fonctionnement des transformateurs électriques. En effet, ces équipements sont soumis à des pertes de chaleur importantes lors de la transformation de l'énergie électrique, ce qui peut entraîner une surchauffe et une détérioration rapide de leurs composants. De plus, la surchauffe des transformateurs présente des risques d'incendie et peut perturber le fonctionnement du réseau électrique. Dans ce contexte, l'amélioration du refroidissement des transformateurs est un enjeu majeur pour les industriels et les chercheurs. Le premier chapitre de ce mémoire a pour objectif de présenter l'état de l'art dans le domaine du refroidissement des transformateurs et d'expliquer les principes de base du fonctionnement de ces équipements.

I.2 Définition :

Un transformateur est un appareil électrique qui a été conçu pour transférer efficacement l'énergie électrique entre les circuits au moyen de l'induction électromagnétique. L'appareil se compose de deux bobines de fil séparées, à savoir les enroulements primaires et secondaire, qui sont enroulées autour d'un noyau magnétique en fer ou en acier.

L'enroulement primaire est chargé de générer un champ magnétique lorsqu'un courant alternatif (AC) le traverse. Ce champ magnétique, à son tour, induit une tension dans l'enroulement secondaire qui est directement proportionnelle au nombre de spires de l'enroulement secondaire par rapport au nombre de spires de l'enroulement primaire.

L'importance des transformateurs réside dans leur capacité à augmenter ou diminuer la tension de l'électricité transmise. Ceci est crucial dans les systèmes de transmission et de distribution d'énergie, car les tensions plus élevées sont transmises plus efficacement sur de plus longues distances, tandis que les tensions plus basses sont plus sûres pour une utilisation dans les maisons et les entreprises. De plus, les transformateurs sont utilisés dans diverses autres applications, telles que l'adaptation de l'impédance entre les composants des appareils électroniques ou le réglage du volume ou de la tonalité d'un signal dans les équipements audio.

Dans l'ensemble, l'impact du transformateur sur les systèmes électriques modernes ne peut être surestimé. Avec sa capacité à transférer efficacement l'énergie électrique entre les circuits, le transformateur a révolutionné la façon dont l'électricité est générée, transmise et utilisée dans diverses applications.

I.3 Le rôle de transformateur :

Les transformateurs électriques ont une importance capitale dans notre vie quotidienne, car ils sont responsables de la réduction ou de l'augmentation du courant électrique afin de répondre aux besoins de nos appareils électriques. Les transformateurs électriques sont utilisés pour réguler le flux de tension pendant la charge, car une tension irrégulière peut provoquer des surtensions électriques et endommager les appareils en cours de chargement.

Les transformateurs électriques jouent également un rôle important dans la production d'acier, où des tensions élevées sont nécessaires pendant la fusion et le soudage, tandis que des courants faibles sont requis lorsqu'il est temps de refroidir. Les transformateurs électriques sont également utilisés dans le traitement chimique, où ils alimentent le processus d'électrolyse en régulant le courant électrique qui alimente la réaction chimique. Certains des métaux électrolytiques couramment utilisés sont l'aluminium, le cuivre et le zinc, et les transformateurs électriques sont responsables de la gestion du courant dans cette réaction [1].

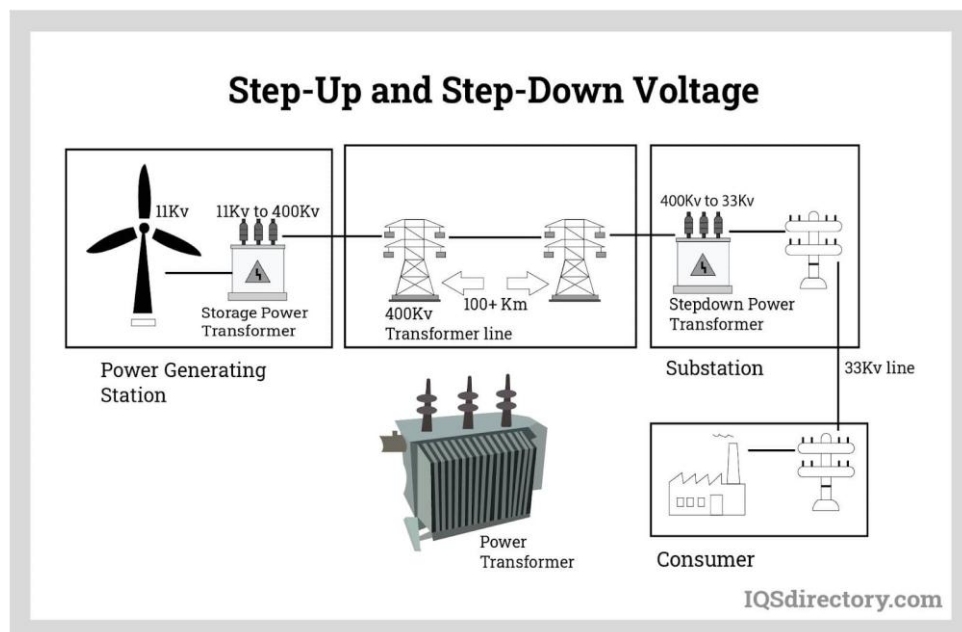


Figure I.1: le rôle de transformateur

I.3 Invention [2]

Le transformateur électrique est considéré comme l'une des inventions les plus importantes de l'ère industrielle, aux côtés de la vapeur, de l'eau courante et de l'éclairage au gaz, car il a permis l'utilisation de l'électricité. En fait, sans le transformateur, l'utilisation de l'électricité n'aurait pas été possible.

Essentiellement, le transformateur est nommé d'après sa capacité à transformer (ou convertir) l'énergie électrique d'une tension élevée à une tension plus basse. Il existe des centaines de types de transformateurs différents conçus pour gérer des tensions extrêmement élevées et basses, ainsi que toutes les tensions intermédiaires. La complexité des transformateurs est profonde, avec des modèles conçus pour gérer différents types électriques (monophasé ou multi phase) et des applications qui incluent la transmission radio. Chez ACUPWR, nous fabriquons des transformateurs de tension et des convertisseurs qui correspondent aux exigences de tension des équipements et des dispositifs électriques, en particulier lorsqu'ils sont utilisés dans un pays ou une région où la tension de ligne CA est différente.

Les origines des transformateurs électriques remontent au scientifique et inventeur anglais Michael Faraday et à sa découverte de la loi de l'induction électromagnétique. Connu sous le nom de loi de Faraday, cette théorie décrit le phénomène de la tension électrique générée lorsqu'une bobine de fil était enroulée autour d'un noyau de fer. Ce courant traversait le fer jusqu'à un côté opposé (le fer avait une forme similaire à celle d'un beignet), et un courant avec une tension différente pouvait être créé à l'aide d'un fil ayant plus ou moins de tours. Ainsi, l'électricité était induite. Le scientifique américain Joseph Henry est également crédité d'avoir inventé le concept d'induction électromagnétique.

Cependant, comme de nombreuses inventions révolutionnaires qui ont changé la vie, le mérite du transformateur électrique ne revient pas à une seule personne. Au lieu de cela, en utilisant la loi de Faraday comme principe directeur, une succession d'inventeurs a fait des percées vers ce qui est devenu le premier transformateur commercialement viable, du moins d'une manière qui a révolutionné la vie des gens. En 1836, le révérend Nicholas Callan a développé un transformateur à induction qui l'a aidé à créer une batterie haute tension (capable d'alimenter une machine capable de soulever 2 tonnes) qui a été produite en masse à Londres.

D'autres noms ont joué un rôle, chacun contribuant un peu plus à l'application de la loi de Faraday et des bobines d'induction magnétique. En 1876, un Russe, Pavel Yablochov, a inventé un système d'éclairage basé sur la bobine d'induction. Lucien Gaulard et John Gibbs, respectivement français et anglais, ont conçu un transformateur et un générateur secondaire en Angleterre qui ont révolutionné l'alimentation électrique en courant alternatif. En 1884, trois physiciens d'Autriche-Hongrie, Otto Blathy, Miklos Zipernows ont été les pionniers des conceptions de transformateurs qui sont encore utilisées aujourd'hui. ZBD, comme le trio est connu, a également créé la première centrale électrique au monde utilisant des générateurs de courant alternatif. Thomas Edison, a acheté les innovations de ZBD pour aider à créer des services publics d'électricité et des réseaux électriques dans les villes. Pendant ce temps, le rival d'Edison, l'inventeur américain George Westinghouse, a acheté les droits de l'invention de Gaulard. En 1886, William Stanley a créé un transformateur AC pratique basé sur l'invention de Gaulard. S'associant à Westinghouse, Stanley, à la demande de Westinghouse, a déménagé à Great Barrington, Massachusetts pour créer un réseau électrique utilisant le courant alternatif.

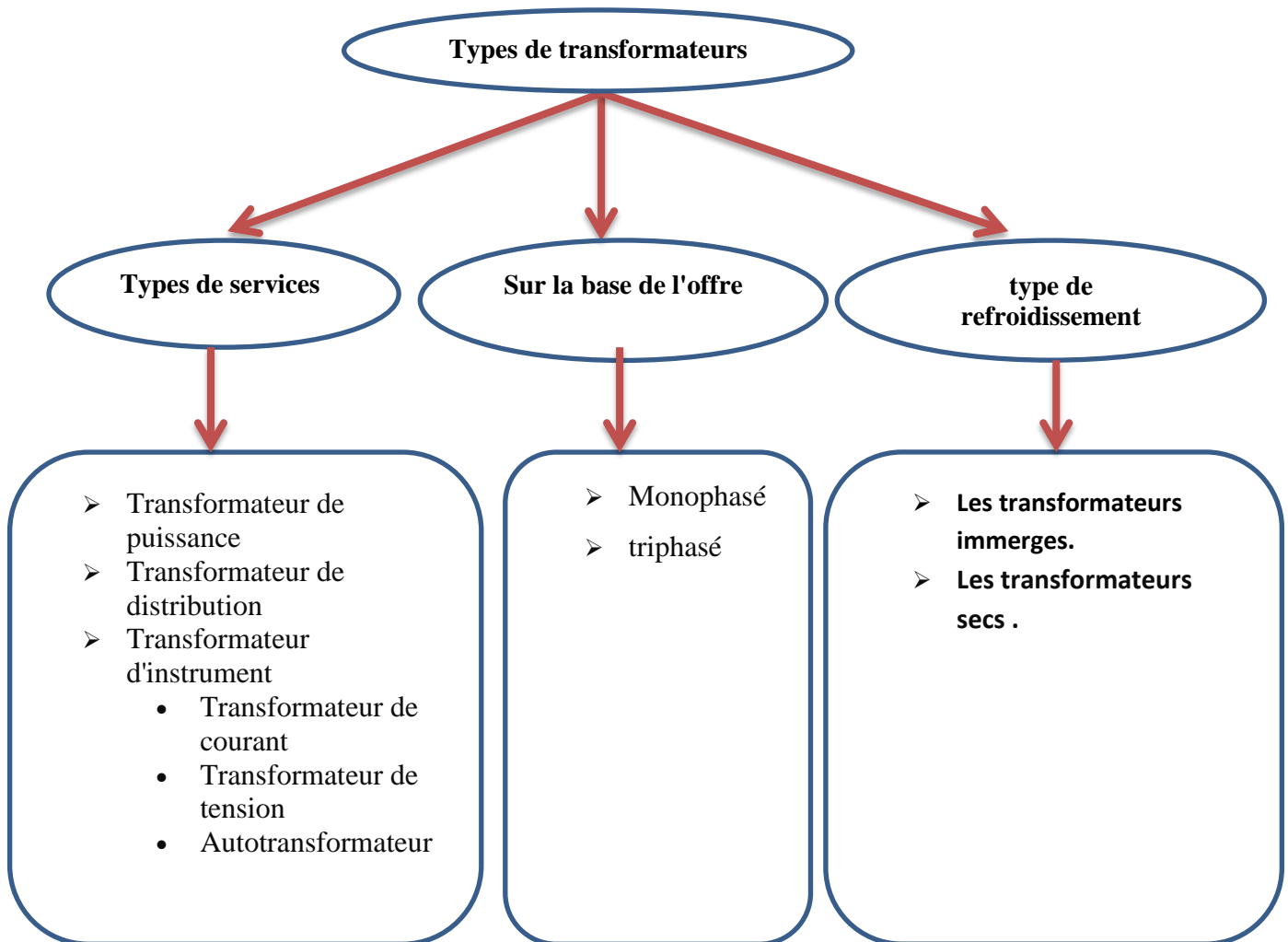
L'innovation de Stanley consistant à créer une distribution d'énergie à Great Barrington était un développement révolutionnaire qui a fait de l'alimentation en courant alternatif préférée de Westinghouse la norme aux États-Unis pour fournir de l'électricité dans les villes, l'emportant sur Thomas Edison et son choix préféré de courant continu (courant continu). Bien sûr, tout le monde y gagne à la fin, surtout lorsqu'ils utilisent des transformateurs ACUPWR pour convertir les tensions de ligne



Figure I. 2:Le prototype de transformateur Stanley original de 1885 au Berkshire Museum.

I.4 Les types de transformateurs

Le domaine d'utilisation des transformateurs est très vaste, Il est divisé selon :



I.4.1 Types de services

I.4.1.1 Transformateur de distribution [3]

Un transformateur de distribution est un appareil qui transfère l'énergie du réseau électrique à votre maison, vos entreprises et vos bâtiments commerciaux. On les trouve souvent sur des poteaux dans des zones résidentielles ou sur le côté d'immeubles où il y a beaucoup de circulation piétonnière. Ils peuvent également être vus sous terre à certains endroits avec peu de place pour les lignes aériennes.

Ces appareils sont également appelés transformateurs abaisseurs car ils réduisent les tensions des niveaux supérieurs aux niveaux inférieurs que les consommateurs peuvent gérer sans endommager leurs appareils ou leurs appareils électroniques. Les transformateurs de distribution utilisent de grandes bobines de fil de cuivre enroulées autour d'un noyau de fer à l'intérieur du boîtier du transformateur. Les bobines transportent le courant électrique à travers le noyau de fer, qui transfère l'énergie d'une bobine à l'autre sans interrompre la tension.

Et ils sont également différents des lignes d'alimentation de distribution car ils ne se connectent qu'à un seul bâtiment ou ensemble de bâtiments au lieu de combiner plusieurs installations comme le font les lignes d'alimentation.

Ainsi, les transformateurs de distribution réduisent la tension d'une ligne de transmission. Et un transformateur de distribution a la même structure de base qu'un autotransformateur, mais ses enroulements sont connectés de manière à pouvoir fournir du courant aux deux côtés de la charge.



Figure I. 4:transformateur de distribution

I.4.1.2 Les transformateurs de puissance [3]

Les transformateurs de puissance sont des instruments électriques utilisés pour transmettre de l'énergie électrique d'un circuit à un autre sans changer la fréquence. Ils fonctionnent selon le principe de l'induction électromagnétique. Ils sont utilisés pour transmettre l'énergie électrique entre les générateurs et les circuits primaires de distribution. Les transformateurs de puissance sont utilisés pour élever ou abaisser la tension dans les

réseaux de distribution. Puisqu'ils n'ont pas de pièces rotatives ou mobiles, ces instruments sont considérés comme des appareils statiques. Ces instruments fonctionnent sur la base d'un système électrique à courant alternatif (AC).

Un transformateur de puissance est classé avec une plage de tension variant entre 33 kV et 400 kV et une puissance supérieure à 200 MVA. Les tensions nominales des transformateurs de puissance disponibles sur le marché incluent 400 kV, 200 kV, 110 kV, 66 kV et 33 kV. Les autres types de transformateurs comprennent les transformateurs de distribution (230 V-11 kV) et de mesure.

Les transformateurs de puissance sont essentiels pour minimiser les pertes d'énergie substantielles, dues à l'effet Joule, dans la transmission de grandes quantités d'énergie électrique sur de longues distances en la convertissant en courant haute tension puis en la réduisant à un courant basse tension plus sûr. On les trouve couramment dans les centrales électriques, les installations industrielles et les entreprises de services publics d'électricité.



Figure I. 5: Transformateur de puissance.

I.4.1.3 Transformateur de courant

Selon la définition de la commission électrotechnique internationale [C.E.I], "un transformateur de courant est un transformateur de mesure dans lequel le courant secondaire est, dans les conditions normales d'emploi, pratiquement proportionnel au courant primaire et déphasé par rapport à celui-ci d'un angle approximativement nul pour un sens approprié des connexions. [4]

Un transformateur de courant est un transformateur utilisé pour mesurer le courant alternatif (AC). Le courant primaire, le courant que l'on souhaite mesurer, est conduit à travers le noyau du transformateur, créant un champ magnétique dans le noyau. Ce champ

magnétique induit un courant secondaire dans l'enroulement du transformateur qui est proportionnel au courant primaire et correctement déphasé. Ce type de transformateur utilise pour transformer un courant élevé en un courant plus bas proportionnel à l'original, afin de mesurer facilement et en toute sécurité le courant. Les transformateurs de courant sont largement utilisés dans les compteurs d'énergie, les instruments de mesure de puissance, les relais de protection,

I.4.1.4 Transformateur de tension

Selon la définition donnée par la commission électrotechnique internationale [C.E.I], un transformateur de tension est « transformateur de mesure dans lequel la tension secondaire est, dans les conditions normales d'emploi, pratiquement proportionnelle à la tension primaire et déphasée par rapport à celle-ci d'un angle voisin de zéro, pour un sens approprié des connexions »[4]

Ce transformateur de tension est utilisé pour mesurer la tension dans les réseaux à haute tension afin de protéger les équipements électriques et d'assurer leur bon fonctionnement. Il permet d'abaisser la tension de manière proportionnelle à la valeur mesurée pour qu'elle soit compatible avec les instruments de mesure ou de protection.

Par conséquent, la caractéristique la plus importante de ce type est son rapport de transformation, par exemple 400 000 V/100 V

I.4.1.5 Autotransformateur [5]

Dans ce type de transformateur, le secondaire est en réalité une partie de l'enroulement primaire. Le courant alimentant le transformateur traverse l'ensemble de l'enroulement primaire, et une dérivation à un point spécifique sur l'enroulement primaire détermine la tension de sortie du secondaire. Le rapport entre la tension d'entrée/sortie de l'autotransformateur est identique à celui d'un transformateur isolé.

Comparé à un transformateur isolé, un autotransformateur nécessite moins d'espace pour son installation, car il n'a qu'un seul enroulement, la partie commune de l'enroulement étant utilisée pour transporter la différence de courant entre les enroulements primaire et secondaire. Les autotransformateurs sont particulièrement utiles lorsque les tensions d'entrée et de sortie sont de magnitudes similaires, comme dans le cas d'une application 230V/115V.

Une utilisation courante des autotransformateurs est d'alimenter des équipements électroniques conçus pour une utilisation dans des pays avec des normes de tension secteur différentes, comme les États-Unis ou le Japon. Dans ces cas, un autotransformateur peut être utilisé pour ajuster la tension de l'équipement au niveau approprié.

Dans le cas de l'alimentation triphasée, les autotransformateurs peuvent être utilisés pour relier les réseaux 400 kV et 225 kV dans le système de transport et de distribution d'énergie. Ces transformateurs sont toujours connectés en configuration étoile, et leur analyse est similaire à celle des transformateurs triphasés

I.4.2 Sur la base de l'offre

I.4.2.1 transformateur monophasé

Un transformateur monophasé est un type de transformateur qui comporte un seul circuit magnétique et deux enroulements (un primaire et un secondaire.). Il est utilisé pour convertir une tension alternative monophasée à un autre. Ce type de transformateur est utilisé pour alimenter des appareils électriques comme les moteurs monophasés et les climatiseurs.

I.4.2.2 Transformateur triphasé

Ce type de transformateur est utilisé pour la distribution de l'énergie électrique dans les réseaux triphasés. Il consiste trois enroulements primaires et trois enroulements secondaires, ce qui lui permet de convertir la tension et le courant entre trois phases différentes. Dans les réseaux triphasés, l'utilisation de trois Transformateurs monophasés, un pour chaque phase. En pratique, il est possible d'utiliser un transformateur triphasé (un seul appareil regroupe les 3 phases). [4]

I.4.3 Selon le type de refroidissement

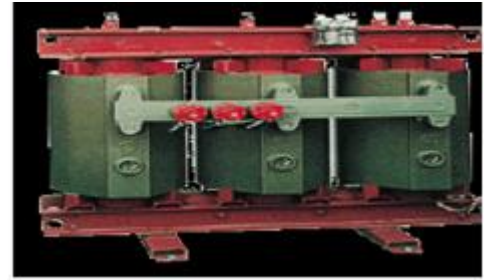
I.4.3.1 Les transformateurs immergent [4]

Les transformateurs immergés sont des transformateurs dont le noyau et les enroulements sont immergés dans liquide (huile) .cette liquide permet d'isoler Le circuit magnétique et les enroulements et assurer la dissipation de la chaleur qui généré par les pertes du transformateur.



I.4.3.2 Les transformateurs secs :

Les transformateurs secs sont des transformateurs qui utilisent un isolant solide comme la résine époxy [4]. Le refroidissement de l'isolant et des enroulements est assurée par l'air ambiant directement.



I. 5 Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement d'un transformateur est basé sur l'induction électromagnétique. Il se compose de deux enroulements de fil isolé (appelé bobine) placés à proximité l'un de l'autre mais non connectés électriquement. Le premier enroulement est appelé enroulement primaire et est connecté à l'alimentation, et le deuxième enroulement est appelé enroulement secondaire et est connecté à la charge.

Lorsque la tension alternative est appliquée au primaire, le courant alternatif circule dans cet enroulement créant un champ magnétique alternatif autour du noyau magnétique du transformateur. Ce champ magnétique alternatif traverse l'enroulement secondaire et induit une tension alternative, les tensions induites sont proportionnelles aux nombres de spires. Le transformateur permet de transférer l'énergie électrique de l'enroulement primaire à l'enroulement secondaire, avec une modification éventuelle de la tension et du courant.

Le transformateur est un convertisseur alternatif-alternatif. Il a pour rôle de modifier les amplitudes de grandeurs alternatives (tensions, courants) en maintenant la fréquence et la forme d'ondes inchangées. Les transformateurs peuvent être abaisseur ou élévateur de tension ou de courant. [5]

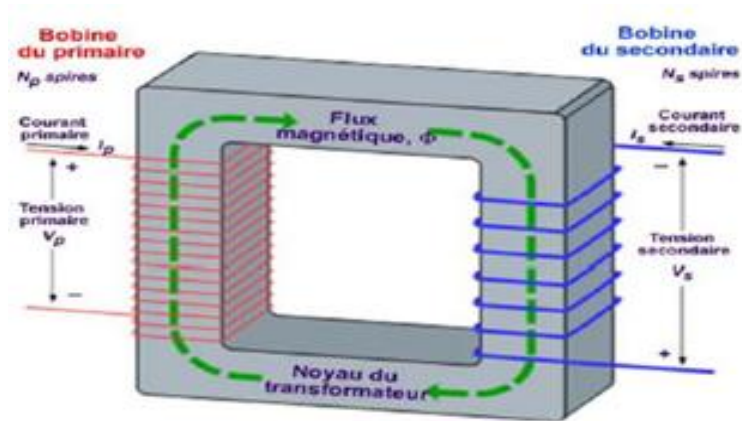


Figure I. 8 : Principe de fonctionnement d'un transformateur.

I.5.1 Schéma équivalent d'un transformateur

Le schéma équivalent d'un transformateur de tension est donné sur la figure I.7 :

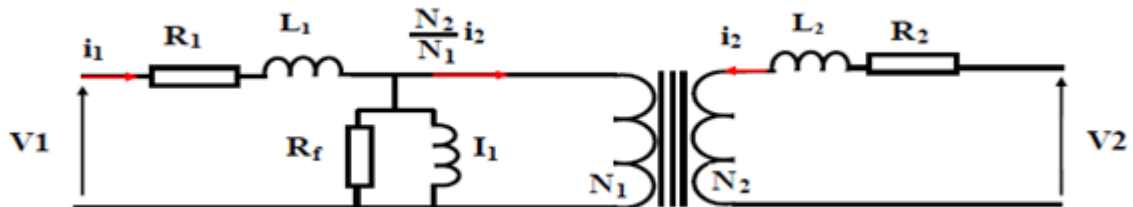


Figure I.9: Schéma équivalent d'un transformateur.

Avec

V1 : Tension primaire
R1 : Résistance primaire
L1 : Réactance primaire
I1 : Réactance magnétique
Rf : Résistance de fer

V2 : Tension secondaire
R2 : Résistance secondaire
L2 : Réactance secondaire
i1 : Courant de primaire
i2 : Courant de secondaire

I.6 Éléments de transformateur

Le transformateur est un appareil d'induction qui est composé de deux(2) parties principales qui sont :

- ✓ Partie active : Constitué essentiellement du circuit magnétique, électrique. Elle est destinée à conversion d'énergie électrique.
- ✓ Partie constructive (Circuit électrique) : destinée à assurer l'isolement et la fixation de la partie active.

I.6.1 Partie active

➤ Le noyau (Circuit Magnétique)

Un circuit ferromagnétique est construit pour permettre la circulation d'un flux de champ magnétique. Le champ magnétique est généralement établi via des enroulements qui entourent le circuit magnétique et à travers lesquels passe un courant ou via des aimants qui sont logés dans le circuit magnétique, la fonction principale du circuit est de diriger le flux magnétique produit par les enroulements.[6]

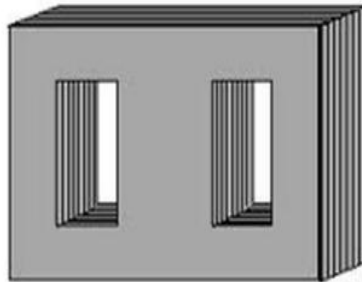


Figure I.10: Circuit Magnétique d'un transformateur triphasé.

Suivant le type du noyau qui constitue le transformateur on distingue :

- ✓ Le transformateur à colonnes ;
- ✓ Le transformateur cuirassé ;

a) Transformateur à colonnes

Le transformateur à colonnes est un appareil composé de deux enroulements concentriques par phase, qui sont disposés autour d'un noyau ferromagnétique. Ce dernier est équipé de culasses à ses efforts pour faciliter le flux magnétique. Dans cette technologie, les enroulements entourent le circuit magnétique pour optimiser le couplage et minimiser la taille des conducteurs. Les conducteurs peuvent varier en taille et en topologie selon les puissances requises.[07]

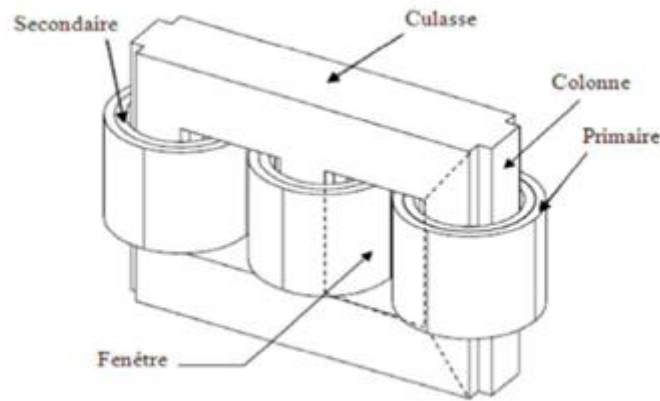


Figure I. 11: Transformateur à colonnes

La nouvelle transformatrice haute tension et haute puissance présente une conception simplifiée. Constitué d'un circuit magnétique à flux forcé à trois colonnes ou noyaux, il optimise la direction du flux magnétique et permet un refroidissement efficace. Les dimensions des conducteurs sont adaptées à la mise en puissance en jeu pour minimiser les pertes d'énergie.

b) Transformateur cuirassé

Les transformateurs de ce type utilisent un circuit magnétique qui englobe entièrement l'enroulement des deux côtés. L'ensemble ainsi obtenu, à l'aide d'un réservoir, assure à la fois stabilité mécanique et compacité. Généralement utilisés dans les réseaux de transmission et de distribution où se matérialisent les surtensions transitoires, des écrans sont également présents pour minimiser la pression liée au champ électrique sur les bobines. [07].

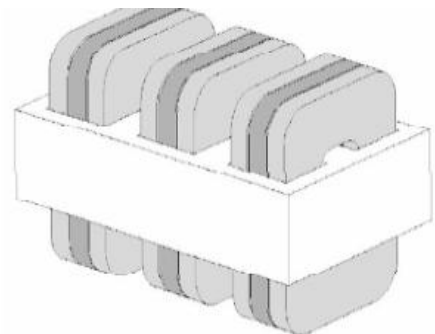


Fig. (I.4) : transformateur cuirassé

Figure I.12: Transformateur cuirassé

➤ **Bobinage (Les enroulements) :**

Pour maintenir un flux magnétique uniforme (Φ), les enroulements de cuivre comprenant les transformateurs doivent être positionnés aussi près que possible les uns des autres, principalement fabriqués à partir de cuivre.

Un transformateur constitue l'enroulement primaire et l'enroulement secondaire. Les deux enroulements partagent le flux magnétique, mais il existe une isolation électrique complète entre eux. Le cuivre est le matériau principal utilisé pour les enroulements de transformateur, bien que certains utilisent de l'aluminium. Les conducteurs multibrins sont

utilisés pour les transformateurs de forte puissance afin d'atténuer les effets de peau et les pertes par courants de Foucault [08].



Figure I.13 : photo des enroulements d'un transformateur triphasé.

I.6.2 Partie constructive (Circuit électrique)

Les pièces constructives du transformateur sont :

➤ La cuve du transformateur

La cuve est un réservoir à huile pour les transformateurs émergés, Généralement fabriqué à partir de tôle façonnée en ondulations, facilitant l'échange thermique. . La cuve joue un rôle d'isolation et de protection mécanique à la partie active (le circuit magnétique et les enroulements) , il permet également la dissipation de la chaleur



➤ Le couvercle :

Le couvercle remplit deux fonctions importantes : il assure la fermeture de la cuve pour protéger les enroulements et l'huile isolante. Deuxièmement, il sert de support pour les accessoires tels que les traversées. Généralement fabriqué en acier, le couvercle contient également des cavités dans sa structure. [09].

➤ Le conservateur d'huile

Le conservateur est un dispositif important dans un transformateur. Il permet d'assurer le remplissage de la cuve avec de l'huile isolante et de réduire la surface d'huile en contact avec l'air extérieur, plus de cela, il sert également de dispositif de contrôle de niveau d'huile.

➤ **Les traversées**

Les circuits extérieurs sont connectés aux enroulements via des traversées. Ces dernières sont des tubes isolants en porcelaine, attachés sur le couvercle. Leur forme et leur taille diffèrent selon la tension, la puissance et l'application du transformateur [09].

I.7 Isolation

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

➤ **Isolation cellulosique**

L'isolation cellulosique est l'un des types d'isolation utilisés dans la partie active d'un transformateur de puissance, Les isolants solides tels que le papier le cylindre isolant et le carton.[09] Ces dernières sont fabriquées à partir de matériaux cellulosiques et sont considérés comme le meilleur choix technique et économique pour l'isolation du système imprégné dans les transformateurs de puissance.

➤ **Isolation liquide**

Elle consiste à immerger les parties actives du transformateur dans un liquide isolant, généralement de l'huile minérale. La fonction principale de l'huile est d'assurer l'isolation diélectrique et le refroidissement du transformateur. Les huiles modernes sont plus stables et moins corrosives car elles ne contiennent pas de soufre. [10]

En général, les huiles isolantes utilisées dans les transformateurs doivent répondre à certaines exigences pour assurer leur bon fonctionnement. Elles devront :

- point d'inflammable élevée
- Point de congélation basse
- faible viscosité
- une bonne résistance à l'électrification statique.

I.8 Principaux éléments des transformateurs

Typiquement, un transformateur se compose d'un circuit magnétique feuilleté et d'un ensemble de bobines séparées par un écran électrostatique entourant le noyau magnétique. Chaque bobine formant le milieu conducteur est organisée en paquets de spires, chaque spire étant constituée de brins élémentaires.

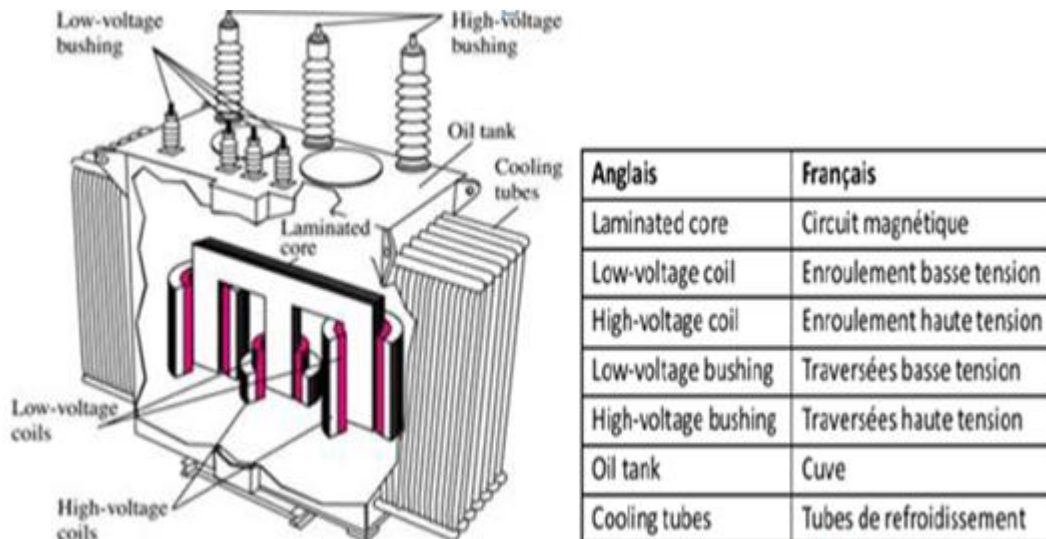


Figure I.15 : coupe d'un transformateur de puissance.

I.9 Les couplages [11]

I.9.1 Mode de couplage :

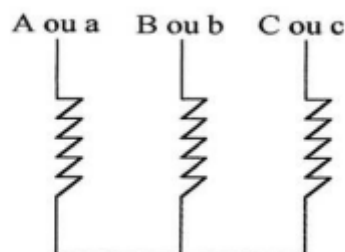
En entrée du transformateur, les enroulements peuvent être branchés en deux configurations différentes : soit en étoile (Y), soit en triangle (D).

En sortie du transformateur, les enroulements peuvent être connectés de trois manières différentes : en étoile (Y), en triangle (D) ou en zigzag (Z)

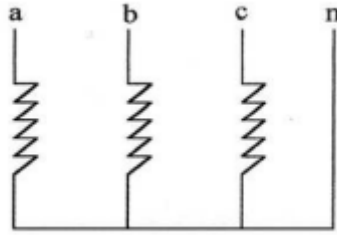
➤ Couplage étoile :

Ce dispositif permet la sortie du point neutre, ce qui est très pratique pour les basses tensions (BT). Il propose deux options de tension : simple ou composée. De plus, il peut être avec ou sans neutre :

- Sans neutre:

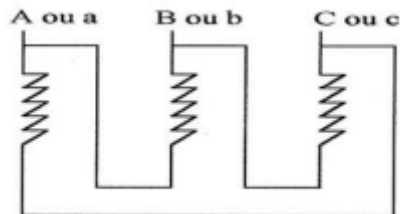


- Avec neutre :



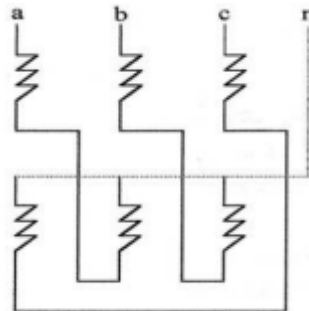
➤ **Couplage triangle:**

Pour cet enroulement, il est nécessaire d'avoir plus de spires par colonne que pour l'enroulement en étoile, il n'y a pas de neutre possible.



➤ **Couplage zig-zag :**

On l'utilise lorsque la charge est déséquilibrée, afin de mieux répartir les déséquilibres sur les trois colonnes.



On obtient ainsi 6 couplages possibles entre primaire et secondaire:

- ✓ Y-y: étoile-étoile.
- ✓ Y-d: étoile-triangle.
- ✓ Y-z: étoile-zigzag.
- ✓ D-y: triangle-étoile.
- ✓ D-d: triangle-triangle.
- ✓ D-z: triangle-zigzag.

I.9.2 Le choix de couplage [12]

Le choix de la bonne couplage électrique triphasée du transformateur dépend de plusieurs facteurs tels que la puissance nominale du transformateur, le type de charge desservie, les tensions de système disponibles et l'angle de phase requis entre les tensions d'entrée et de sortie.

Il existe trois types de couplages de transformateur : triangle (Δ), étoile (Y) et zigzag. Les couplages en triangle sont couramment utilisés pour les systèmes de distribution d'énergie triphasés, tandis que les couplages en étoile sont utilisés dans de nombreuses applications industrielles et commerciales. Le couplage zigzag est utilisée pour convertir une alimentation biphasée en une alimentation triphasée..

Pour déterminer le couplage appropriée du transformateur, vous devez tenir compte des points suivants :

- ✓ Type de charge : différents types de charges nécessitent différents types de couplages. Par exemple, les moteurs et autres charges inductives sont généralement connectés dans une configuration Wye, tandis que les charges résistives sont connectées dans une configuration triangle.
- ✓ Tension du système : Le niveau de tension du système d'alimentation dictera le type de couplage qui peut être utilisé. Des tensions plus élevées nécessitent généralement des couplages triangle, tandis que des tensions plus basses peuvent utiliser des couplages étoile.
- ✓ Angle de phase : l'angle de phase entre les tensions d'entrée et de sortie doit être pris en compte. Si un angle de phase particulier est requis, comme dans certaines applications de correction du facteur de puissance, un couplage zigzag peut être nécessaire.
- ✓ Puissance nominale : La puissance nominale du transformateur est également un facteur critique dans le choix de le couplage en appropriée. La configuration triangle convient aux puissances supérieures, tandis que la configuration étoile convient aux puissances inférieures.

I .10 Plaque signalétique d'un transformateur

Chaque transformateur est muni d'une plaque signalétique en acier inoxydable gravée et fixé à un emplacement visible à l'aide de vis à l'épreuve de la corrosion et donne les indicateurs suivants :

- ✓ Nom de constructeur.
- ✓ Année de fabrication.
- ✓ Numéro de série du constructeur.
- ✓ Norme de fabrication.
- ✓ Puissance nominale en (KVA).

- ✓ Tensions nominales.
- ✓ Intensités nominales.
- ✓ Système de couplage.
- ✓ Tension de court-circuit.
- ✓ Mode de refroidissement.
- ✓ Classe d'isolement.
- ✓ Masse de l'huile.
- ✓ Masse totale.

Tensions		Courants		Ucc	
Primaire	Secondaire	Primaire	Secondaire	Primaire	Secondaire
1	20500 V	2.89 A	140.8 A	4 %	
2	20000 V				
3	19500 V				

I.11 Rapport de transformation :

Le rapport de transformation d'un transformateur est défini comme le rapport de la tension de sortie (au secondaire) à la tension d'entrée (au primaire) et aussi relie par le nombre de spires du primaire et du secondaire. Le mode de couplage des enroulements doit également être pris en compte pour déterminer le rapport de transformation.

➤ **Le rapport de transformation par colonne m_c :**

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

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

➤ **Le rapport de transformation par phase m_{ph} :**

C'est le rapport de la tension composée secondaire à vide par la tension primaire composée :

$$m_{ph} = \frac{U_2}{U_1} \quad \text{I.2}$$

Remarque

- ✓ si $m < 1$ à $U_2 < U_1$: le transformateur est dit abaisseur.
- ✓ si $m > 1$ à $U_2 > U_1$: le transformateur est dit élévateur.
- ✓ si $m = 1$ à $U_2 = U_1$: le transformateur est dit d'isolement

I.12 L'échauffement :

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

I.12.1. Pertes de base ou pertes de fer [13]

a) Les pertes par hystérésis

Les pertes par hystérésis dans un transformateur sont dues à la résistance que les molécules du noyau magnétique opposent à la réorientation de leur moment magnétique dans les cycles magnétiques. Les pertes par hystérésis sont proportionnelles à la fréquence de l'alimentation électrique et à l'intensité du champ magnétique. Lorsque le noyau magnétique subit des cycles magnétiques, une quantité d'énergie est dissipée sous forme de chaleur, appelée perte par hystérésis. Les pertes par hystérésis dépendent de la fréquence de l'alimentation électrique et de l'intensité du champ magnétique. Pour minimiser les pertes par hystérésis, les transformateurs modernes utilisent des noyaux en acier au silicium.

b) Les pertes par courants de Foucault [13]

Les pertes par courants de Foucault dans un transformateur sont causées par les courants induits dans les noyaux magnétiques, qui génèrent un champ magnétique qui s'oppose au champ initial et provoque une perte d'énergie sous forme de chaleur. Ces pertes dépendent de la fréquence et de l'intensité du courant ainsi que du matériau utilisé pour les noyaux. L'utilisation de noyaux en acier à grains orientés aide à réduire les pertes, améliorant ainsi l'efficacité énergétique et réduisant les coûts d'exploitation.

I.12.2 Perte de cuivre [13]

La perte de cuivre est une des pertes les plus importantes dans un transformateur électrique. Elle est causée par la résistance électrique du fil conducteur utilisé dans les enroulements, ce qui entraîne une dissipation d'énergie sous forme de chaleur. La perte de cuivre pour l'enroulement primaire est calculée en utilisant la formule $I_1^2 R_1$ et pour l'enroulement secondaire en utilisant la formule $I_2^2 R_2$,

où

I_1 et I_2 : le courant dans les enroulements primaire et secondaire

R_1 et R_2 : les résistances des enroulements primaire et secondaire.

La perte de cuivre dans le transformateur varie en fonction de la charge électrique

I.12.3 Perte diélectrique [13]

L'huile du transformateur est la cause de cette perte. L'huile dans le transformateur est un matériau isolant. Lorsque l'huile dans le transformateur se détériore, l'efficacité du transformateur sera affectée.

I.12.4 Mesurer l'efficacité du transformateur

Comme toute autre machine électrique, le rendement d'un transformateur peut être défini comme la puissance de sortie divisée par la puissance d'entrée.

C'est l'efficacité = sortie / entrée.

$$\eta = \frac{\text{puissance fournie au secondaire [w]}}{\text{puissance totale absorbé au primaire [W]}} \quad \text{I.3}$$

Dans les appareils électriques, les transformateurs sont les plus efficaces. Cela est dû au fait que la plupart des transformateurs ont un rendement à pleine charge compris entre 95% et 98,5%.

Remarque

Pour le rendement d'un transformateur sera maximum il faut que les pertes cuivre et les pertes fer seront égales.

I.13 Systèmes de Refroidissement des Transformateurs [14]

Les transformateurs sont généralement refroidis à l'aide de fluides, tels que de l'huile minérale, de l'huile synthétique ou de l'eau. Ces fluides sont utilisés pour absorber la chaleur produite par le transformateur et la dissiper vers l'extérieur. Les systèmes de refroidissement peuvent être de type naturel (sans ventilateur ni pompe) ou forcé (avec ventilateur et/ou pompe).

I.13.1 Le rôle du système de refroidissement

Le système de refroidissement d'un transformateur a pour rôle principal de maintenir la température des composants du transformateur dans des limites acceptables pour assurer la bon fonctionnement de ce dernière.

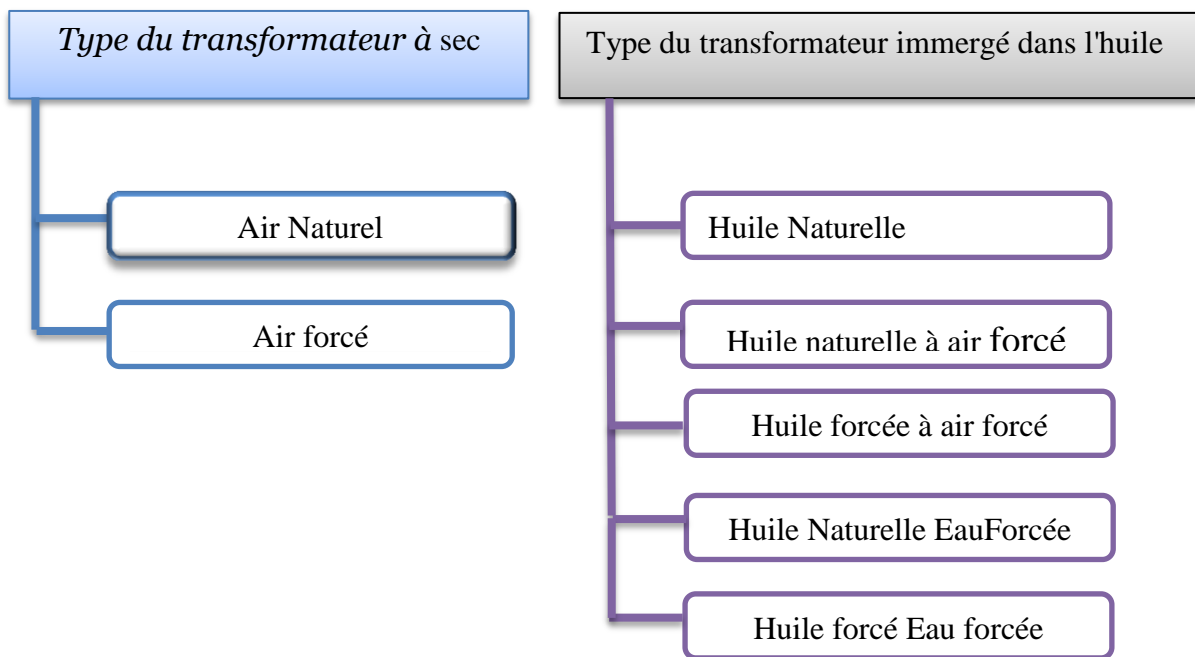
Le refroidissement permet de dissiper la chaleur produite par les pertes électriques dans les composants du transformateur, telles que les bobines et le noyau magnétique, ainsi que les pertes diélectriques dans l'isolation des composants. Si la chaleur n'est pas évacuée efficacement, elle peut entraîner une surchauffe des composants, qui peut conduire à leur endommagement.

I.13.2 Les types de Refroidissement des transformateurs

Le refroidissement des transformateurs est une étape essentielle dans leur fonctionnement. En effet, les transformateurs électriques ont tendance à produire de la chaleur lorsqu'ils sont en service, et cette chaleur doit être évacuée pour éviter une surchauffe qui pourrait endommager les composants du transformateur

Le facteur principal pour la génération de chaleur dans le transformateur est constitué par les pertes telles que l'hystérésis, les courants de Foucault, le fer et le cuivre. Parmi toutes les pertes, le principal contributeur à la production de chaleur est la perte de cuivre ou I^2R perte par effet joule.

Il existe deux types de refroidissement de transformateurs : les transformateurs secs et les transformateurs immergés dans l'huile. Les méthodes de refroidissement varient selon le type de transformateur utilisé.



I.13.2.1 Méthodes de refroidissement du transformateur à sec

➤ **Air Naturel :**

Cette méthode de refroidissement des transformateurs utilise le flux d'air naturel qui entoure le transformateur pour dissiper la chaleur générée à l'intérieur. Cette méthode est généralement utilisée pour les petits transformateurs, (jusqu'à 1,5 MVA).

Le refroidissement par air naturelle est une méthode de refroidissement simple, fiable et économique. Par conséquent, dans les climats chauds ou dans les applications à haute puissance, cette méthode de refroidissement peut ne pas être suffisante.

➤ **Air forcé**

Cette méthode de refroidissement des transformateurs qui utilise un ventilateur ou une soufflerie pour forcer l'air à circuler autour des enroulements et le noyau du transformateur. Cette méthode est généralement utilisée pour des transformateurs allant jusqu'à 15 MVA.

Le refroidissement par air forcé est plus efficace que le refroidissement par air naturelle car il utilise un flux d'air plus important pour dissiper la chaleur. Cependant, cette méthode de refroidissement peut être plus coûteuse et plus complexe à mettre en œuvre que le refroidissement par convection naturelle.

I.13.2.2 Méthodes de refroidissement du transformateur immergé dans l'huile

➤ **Huile Naturelle Air Naturel (ONAN)**

Dans ce type de refroidissement, le noyau et les enroulements sont assemblés dans un réservoir rempli d'huile. Selon le principe de la convection. Lorsque le transformateur fonctionne et chauffe, la température de l'huile dans le réservoir augmente, l'huile chauffée s'écoule vers le haut, puis dans le radiateur. L'huile chaude est refroidie par la circulation naturelle de l'air ambiant. La chaleur générée dans l'huile du transformateur sera dissipée dans l'environnement grâce au mouvement de l'air naturel qui entoure le transformateur.

Cette méthode est généralement utilisée pour des transformateurs allant jusqu'à 30 MVA.

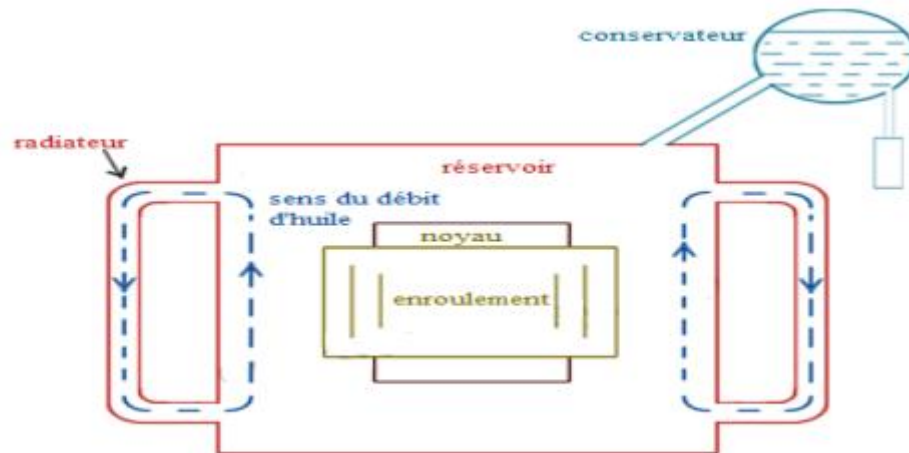


Figure I.18 : Huile Naturelle à Air Naturel du refroidissement de transformateur

➤ **Huile naturelle à air forcé (ONAF) :**

Comme nous l'avons mentionné précédemment dans la méthode ONAN le flux d'air naturel ambiant pour dissiper la chaleur générée par le transformateur mais dans ce type La dissipation de chaleur peut encore être améliorée en appliquant l'air forcé sur la surface de dissipation grâce a les ventilateurs et les soufflantes qui augmente la vitesse de l'air qui traverse le radiateur. Cette méthode est plus efficace que la méthode ONAN et est généralement utilisée pour des transformateurs allant jusqu'à 60 MVA.

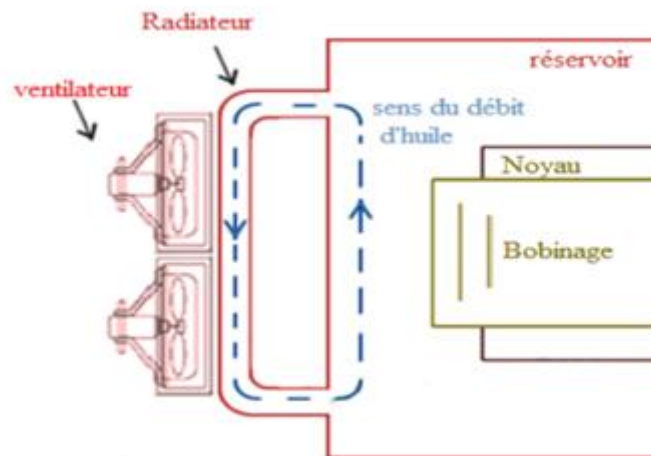


Figure I.19 : Huile Naturelle à Air forcé du refroidissement de transformateur

➤ **Huile forcée à air forcé (OFAF)**

Le système de refroidissement de cette méthode(OFAF) dans l'installation consiste un échangeur de chaleur qui permet la circulation de l'huile chaud grâce a une pompe, l'air forcé à passer à travers l'échangeur de chaleur grâce a des ventilateurs à grande vitesse.

Ce qui permet une dissipation plus efficace de la chaleur. Les échangeurs de chaleur sont raccordés par des tuyaux séparément du réservoir du transformateur.

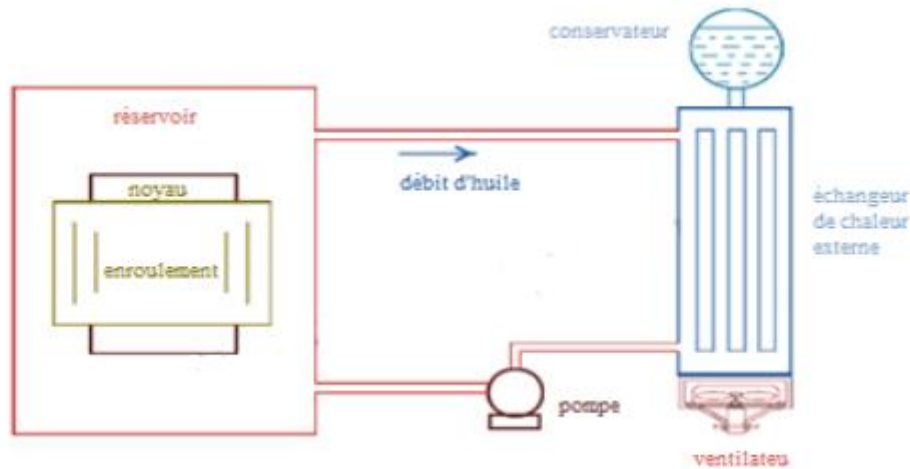


Figure I. 20 : Huile forcé à Air forcé du refroidissement de transformateur

➤ **Huile Naturelle Eau Forcée (ONWF)**

Cette méthode ONWF comme la méthode de ONAF , mais utilise l'eau à la place de l'air forcé pour améliorer l'efficacité de la dissipation de la chaleur . un radiateur est placé à l'extérieur du réservoir du transformateur Lorsque la température augmente, l'huile chauffe, la chaleur dissipant par convection naturelle en passant à travers le radiateur mais l'eau est pompée et passe dans l'échangeur thermique pour le refroidissement de l'huile.

➤ **Huile forcé Eau forcée (OFWF)**

Cette méthode utilise à la fois l'huile et l'eau forcé pour dissiper la chaleur, L'huile circule à l'aide d'une pompe et est refroidie en passant à travers un échangeur de chaleur l' eau forcé circule dans l'échangeur de chaleur pour refroidir l'huile puis l'huile refroidie est renvoyée dans le réservoir du transformateur .Cette méthode est généralement utilisée pour les transformateurs de grande capacité.

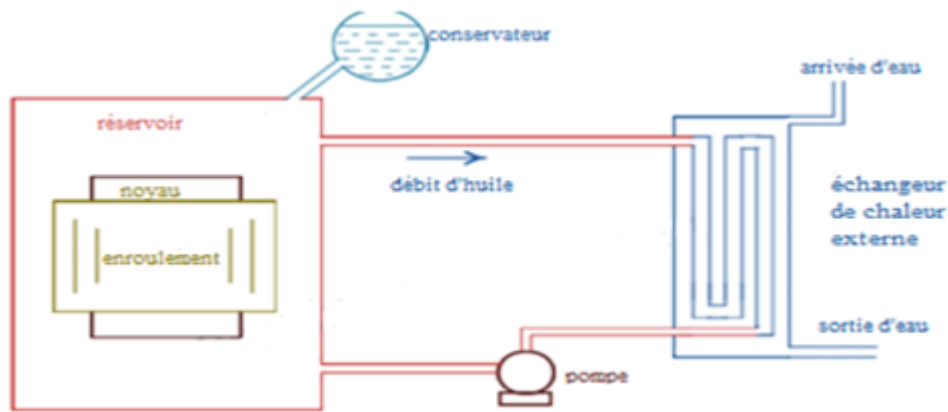


Figure I.21 : Huile forcé du refroidissement de transformateur

I.14 conclusion

En conclusion, ce chapitre permet de comprendre les généralités sur les transformateurs électriques et leur importance dans les réseaux électriques et des différents types et caractéristiques qu'ils possèdent. De plus, nous avons approfondi les différentes méthodes de refroidissement utilisées pour maintenir une température de fonctionnement optimale. Nous avons également examiné les pertes énergétiques principales qui se produisent dans les transformateurs, telles que les pertes par hystérésis, les pertes par courants de Foucault et les pertes de cuivre. Ce premier chapitre est donc une base solide pour la compréhension des aspects techniques et pratiques des transformateurs électriques.



Chapitre II

***Généralité sur le nano
fluide***

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons exploré les généralités sur les nano fluides, en mettant l'accent sur un type spécifique de nano fluide composé de nanotubes de carbone multi-parois (MWCNTs) mélangés à de l'huile de transformateur. Nous avons examiné les composants des nano fluides, y compris les nanoparticules, les liquides de base et les additifs, ainsi que les méthodes de fabrication et de dispersion des nanoparticules dans les nano fluides.

En outre, nous avons discuté des propriétés thermo physiques des nano fluides, telles que la conductivité thermique et la viscosité, qui les rendent adaptés à diverses applications. Nous avons souligné les avantages potentiels des nano fluides, tels que l'amélioration de l'efficacité énergétique et la dissipation de chaleur accrue, ainsi que leurs domaines d'application, tels que l'électronique, l'industrie de l'énergie et la mécanique des fluides.

Cependant, nous avons également pris en compte les inconvénients associés à l'utilisation des nano fluides, notamment la stabilité à long terme et les considérations environnementales. En conclusion, ce chapitre a fourni un aperçu des nano fluides et a mis en évidence les caractéristiques et les applications spécifiques du nano fluide composé de MWCNTs et d'huile de transformateur.

II.2 définition des nano-fluides

Les nano fluides sont la dispersion de particules de taille nanométrique appelées nanoparticules généralement comprise entre 1 et 100 nanomètres dans un fluide de base pour améliorer certaines propriétés. Les nano fluides sont actuellement très demandés en raison de leurs propriétés thermiques uniques. Les fluides de base traditionnellement utilisés pour le refroidissement sont connus pour avoir une faible conductivité thermique, ce qui constitue une limitation majeure de leur capacité de transfert de chaleur. Pour résoudre ce problème, les scientifiques ont proposé l'inclusion des nanoparticules de conductivité très élevée dans les fluides de base. Cela augmente la conductivité thermique globale de la solution, ce qui améliore les performances thermiques. Les nano-fluides sont souvent utilisés pour améliorer les performances de refroidissement dans les applications industrielles telles que les transformateurs électriques, les circuits électroniques, les moteurs automobiles, les centrales électriques.

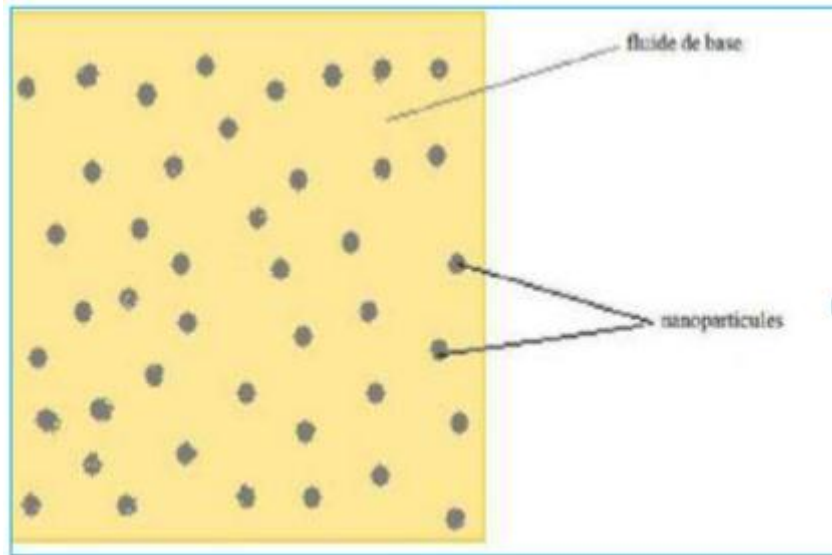


Figure II .1 : nanoparticules dispersées dans le fluide de base

II.3 Les composants des nano-fluides

Les nanoparticules se composent de quelques centaines à des milliers d'atomes, créant des objets d'au moins une dimension, allant de 1 à 100 nanomètres. Ces structures chevauchent l'échelle microscopique et atomique/moléculaire, ce qui en fait des sujets cruciaux de la recherche appliquée et fondamentaux. Actuellement, de nombreuses recherches sont consacrées à ces particules minuscules mais intrigantes. [15]

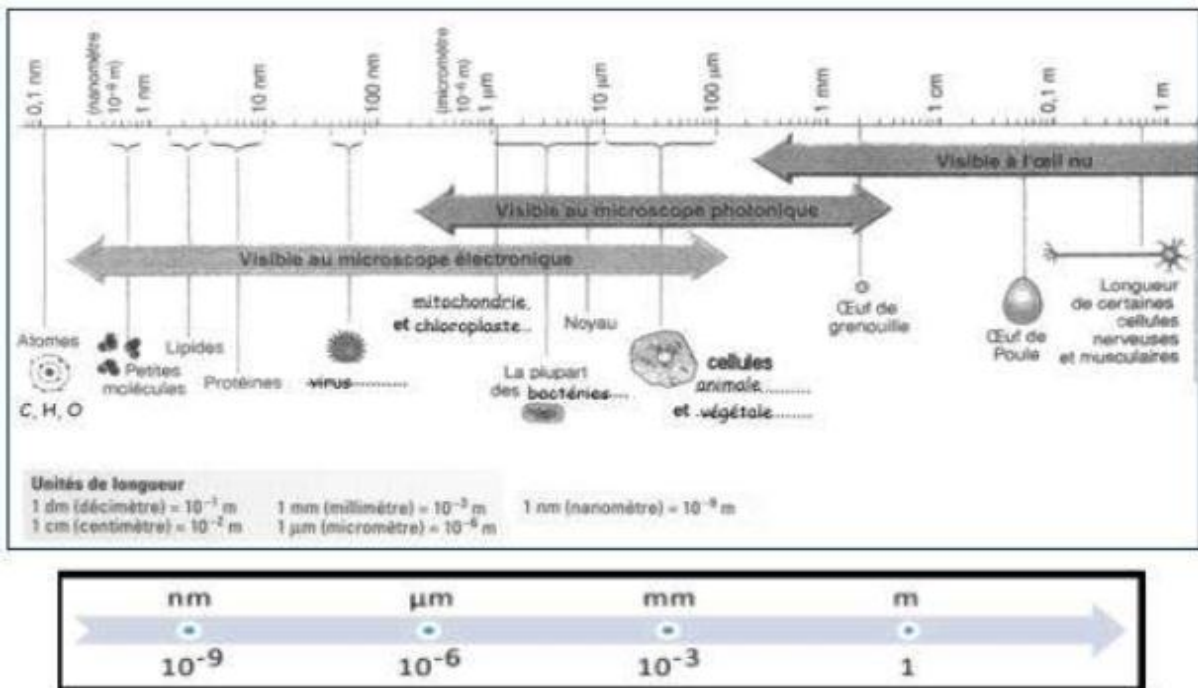


Figure II.2 : Échelle des dimensions nanométrique [15]

Pour la préparation de nano fluides, les liquides de base couramment utilisés sont ceux qui sont fréquemment utilisés dans les applications de transfert de chaleur, tels que :

- Eau.
- Ethylène-glycol.
- Les huiles.
- Le Toluène.
- Les fluides de réfrigération (R12.R22.....)
- Acétone
- Décane

Le tableau II.2 regroupe une liste non exhaustive de combinaisons de nanoparticules et de fluides de base préparés par différents groupes de recherche.

Tableau II. 1 : Combinaisons nanoparticules/fluides de base [15]

	Acétone	Eau	Éthylène glycol	Huile	Toluène	Décène
Ag		x		x		
Au		x			x	
Al ₇₀ Cu ₃₀			x			
Al ₂ O ₃		x	x	x		
Bi ₂ Te ₃						
C(diamant)		x				
C(graphite)		x		x		
C (NTC)		x		x		x
C (fullerène)				x	x	
Cu	x	x	x	x		
CuO		x	x			
Fe			x			
SiC		x				
SiO ₂		x	x			
TiO ₂		x	x			
WO ₃			x			
ZrO ₂		x				

Les nanoparticules couramment utilisées pour la préparation de nano fluides sont les suivantes :

- ✚ Les nanoparticules des oxydes métalliques :
 - L'oxyde d'aluminium (Al₂O₃).
 - L'oxyde de cuivre (CuO).
 - L'oxyde de silicium (SiO₂).
 - L'oxyde de Titanium (TiO₂).

- ✚ Les nanoparticules métalliques:
 - L'aluminium (Al).
 - Le cuivre (Cu).
 - L'or (Au).
 - L'argent (Ag).
 - La silicone, Si.
- ✚ Les nanoparticules non métalliques:
 - Les nanotubes de carbone (CNT).
 - Le diamant (C).

II.3.1 Types de nanoparticule

Les nanoparticules peuvent être classées selon leur forme en deux grandes catégories :

- ✓ Les nanoparticules sphériques pour lesquelles plusieurs types de matériaux peuvent être utilisés pour leur fabrication.[16] Ces nanoparticules sphériques peuvent ainsi être à base de métaux (cuivre Cu, fer Fe, or Au, argent Ag...) ou des oxydes métalliques comme (oxyde d'aluminium Al₂O₃, oxyde de cuivre CuO, oxyde de titane TiO₂...).
- ✓ Les nanotubes (les nanotubes de carbone NTC, les nanotubes de titane TiO₂, Nanotube de silicium...).

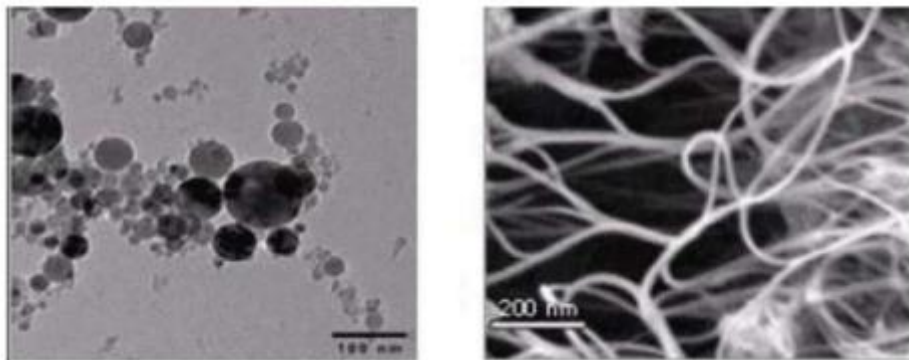


Figure II .3 : nanoparticules sphériques [BAN/2005] ;Nanotubes de carbone

II.4 Nano-fluides mono-matériau :

Un seul matériau nano-fluide a été proposé pour la première fois par Choi (1995), où un seul type de nanoparticules est utilisé pour produire la suspension via plusieurs méthodes de préparation [17].

Nous pouvons trouver les nano-fluides mono matériaux de différentes natures tels que métaux purs, oxydes métalliques, carbures, matériaux carbonés, etc. De plus, les atomes de carbone peuvent se lier entre eux dans un certain nombre de différentes manières de former une variété de matériaux carbonés ou d'allotropies de carbone.

Carbone typique les allotropies comprennent le carbone amorphe, le graphite et le diamant. Les allotropies de carbone peuvent également avoir un variété de structures et de morphologies telles que le cristallin (c'est-à-dire le diamant, les feuilles de graphite et nanotubes de carbone).

Les nanotubes de carbone mesurent quelques nanomètres de diamètre et peuvent atteindre plusieurs centaines de micromètres. Les nano-tubes peuvent être constitués d'une seule couche de graphène enroulée sur elle-même et sont appelés "nano-tubes à paroi unique" (SWCNT). Ils peuvent également être constitués d'un enroulement de plusieurs couches de Graphène et sont alors appelés « Multi-walled carbon nano-tube » (MWCNT)

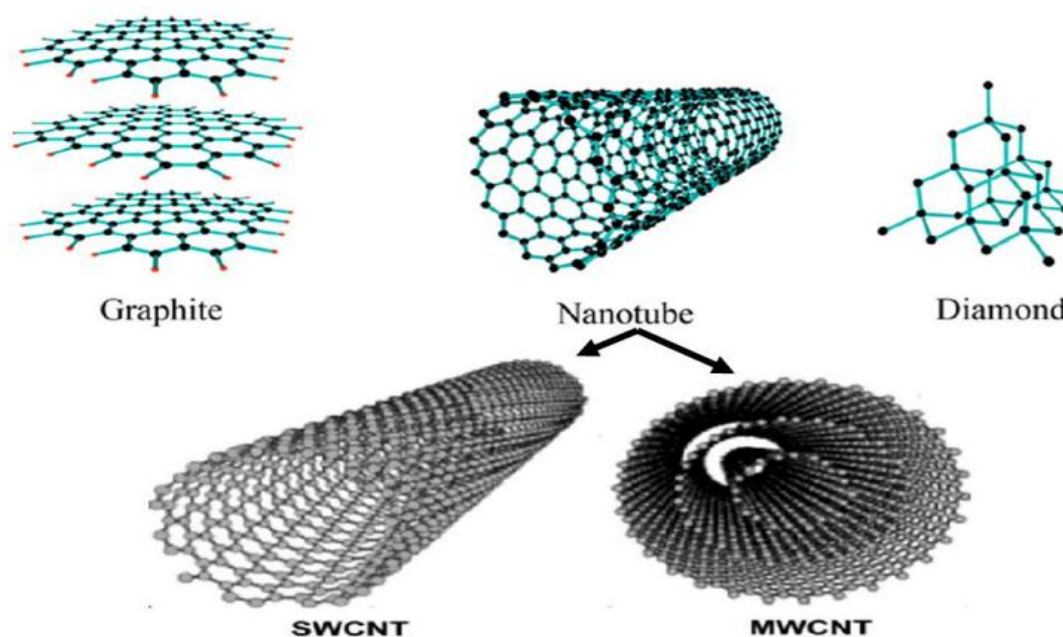


Figure II .4 : Structures moléculaires du graphite, du diamant et d'un nano-tube de carbone[17]

II.5 Fabrication des nanoparticules et des nano-fluides [18]

La fabrication de nanoparticules est une industrie qui nécessite une technologie très précise, vu la taille et les différentes formes exigées par les expérimentateurs pour avoir plus d'études de cas, et la nécessité de certains traitements chimiques de surface pour les maintenir en suspension On peut classer les procédés de préparation de ces nanoparticules en deux catégories :

- Les procédés physiques, comme le broyage mécanique.
- Les procédés chimiques, comme la pyrolyse ou la précipitation chimique.

La préparation des Nano fluides doit tenir compte surtout d'une suspension stable et durable et une agglomération minimale des nanoparticules, et doit assurer qu'elles n'entrent pas en échange chimique avec le fluide de base., il existe deux méthodes principales utilisées pour la préparation des nano-fluides :

II.5.1 méthode en une étape (one-step method) :

Cette méthode consiste à produire les nanoparticules directement dans le liquide de base afin de prévenir leur agglomération et leur oxydation des nanoparticules.

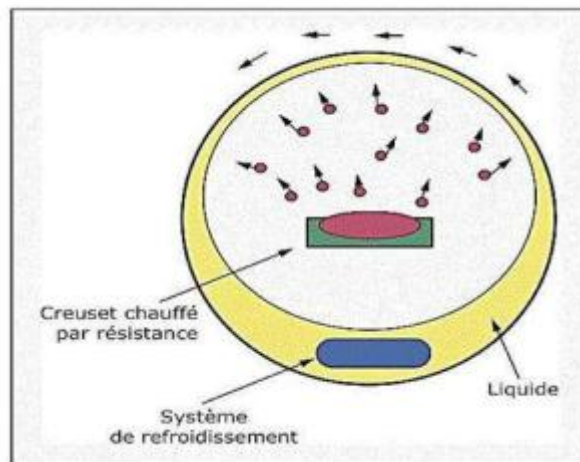


Figure II .5 : Procédé de synthèse de nano-fluide en une seule étape

II.5.2 Méthode en deux étapes:

La méthode en deux étapes est la plus utilisée pour préparer les nano fluides. Dans la première étape, les nanoparticules sont produites sous forme de poudre sèche à l'aide des méthodes chimiques ou physiques. Ces nanoparticules sont ensuite dispersées dans un fluide de base lors de la seconde étape. Parmi les l'équipement utilisé pour disperser les nanoparticules dans le liquide de base est un bain à ultrasons, magnétique agitateurs, mélangeurs à cisaillement élevé.

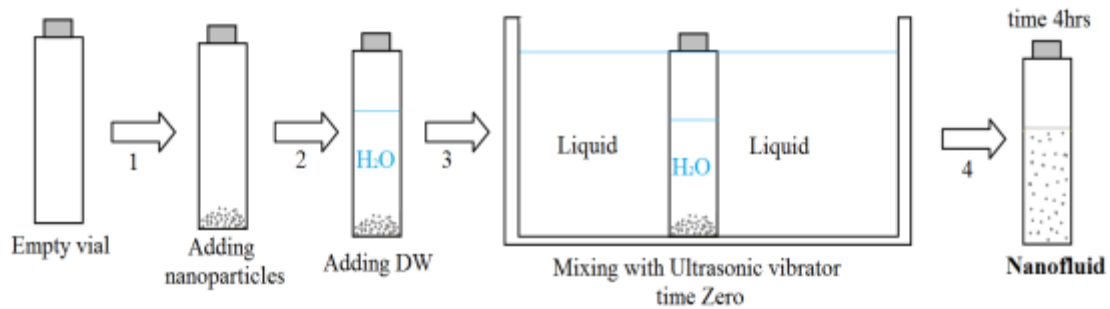


Figure II .6 : Processus de préparation en deux étapes du nano fluide.

II.6 Les propriétés thermo physiques des nano fluides

Les nano fluides ont des propriétés physiques importantes, qui diffèrent selon les nanoparticules utilisées et le fluide de base.

II.6.1 La fraction volumique

La fraction volumique est la propriété la plus importante pour le nano-fluide, puisque les calculs de toutes les autres propriétés sont basées sur la fraction volumique du nano-fluide. La valeur de la fraction volumique est varié entre 0 (fluide de base pure) et 1. La fraction volumique donnée par la relation suivante :

$$\varphi = \frac{V_p}{V_T} \quad \text{II.1}$$

V_p : volume de solide (nanoparticules).

V_T : volume totale.

II.6.2 Conductivité thermique (K):

La conductivité thermique généralement est une propriété importante pour l'amélioration des Performances thermiques d'un fluide de base, la conductivité thermique d'un nano-fluide est calculé selon Les modèles les plus utilisés suivants :

A. Modèle de Maxwell (1873):

Maxwell a présenter son modèle pour calculer la conductivité thermique d'un nano fluide en fonction de la fraction volumique de la nano fluide, L'applicabilité du modèle est limitée aux nano fluides qui comprennent des nanoparticules sphériques. Malheureusement, cette exigence peut être perçue comme un inconvénient pour ce modèle. [20]

La formule de Maxwell est donnée par :

$$K_{nf} = \frac{K_S + 2K_f + 2(K_S - K_f)\varphi}{K_S + 2K_f - (K_S - K_f)\varphi} K_f \quad \text{II.2}$$

Ou

K_{nf} : la conductivité thermique de nano fluide. [W/m.K]

K_f : la conductivité thermique du fluide de base. [W/m.K]

K_S : la conductivité thermique des particules solides. [W/m.K]

B-Modèle de Hamilton et Crosser (1962)

Hamilton et Crosser ont proposé une modification du modèle de Maxwell qui s'adapte aux formes des particules. En effet, pour prendre en compte la non-sphéricité des Particules, ce modèle intègre un facteur géométrique appelé sphéricité et noté ψ faisant référence à la géométrie sphérique.[19] Ce coefficient est défini comme étant le rapport de l'aire d'une sphère de même volume que la particule sur l'aire de cette même particule.

La formule de ce modèle est donnée par :

$$K_{nf} = \frac{K_S + (n-1)K_f - (n-1)(K_f - K_S)\varphi}{K_S + (n-1)K_f + (K_f - K_S)\varphi} K_f \quad \text{II.3}$$

N est un facteur de forme empirique donné par : $n = \frac{3}{\psi}$

$n = 3$ pour les particules sphériques et $n = 6$ pour les particules cylindriques.

Pour ($\psi=1$) (particules sphériques).

c-Modèle de Yu et Choi [29]:

Le modèle de Yu et Choi est une autre expression pour calculer la conductivité thermique. Les particules liquides et solides étaient considérées comme une base séparée avec une couche nanométrique d'un modèle en nano fluides. Cette couche est un pont thermique entre nanoparticules et liquides.

La formule du modèle de Yu et Choi est donnée par :

$$K_{nf} = \frac{K_S + 2K_f + 2(K_S - K_f)(1+\beta)^2\varphi}{K_S + 2K_f - (K_S + K_f)(1+\beta)^2\varphi} \quad \text{II.4}$$

β est le rapport de l'épaisseur de la couche nanométrique sur le rayon des particules.

II.6.3 Viscosité dynamique(μ) :

Lorsqu'un fluide est mis en mouvement, sa résistance à la déformation est appelée viscosité. Cette propriété est souvent utilisée pour mesurer le frottement interne d'un fluide. Un liquide qui présente un frottement interne élevé considérable est classé comme un liquide très visqueux [21]. La qualité de la dispersion des nanoparticules dans le fluide de base et la température sont des facteurs clés qui jouent un rôle important dans la détermination de l'efficacité de la viscosité dynamique des nano-fluides.

Cette viscosité dynamique peut être calculée à partir de la viscosité du fluide de base et la fraction volumique du nano fluide. Parmi les modèles les plus utilisés dans la littérature on cite :

a-Modèle d'Einstein (1906) : La viscosité dynamique d'un nano fluide est donnée par la relation d'Einstein pour un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines rigides [22]. La relation d'Einstein est la suivante :

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 205\varphi) \quad \text{II.5}$$

Avec :

μ_{nf} : La viscosité dynamique du nano fluide .

μ_f : La viscosité dynamique du fluide de base .

φ : La fraction volumique des nanoparticules.

Cette relation est valable juste pour $\varphi = 0.3$

b-Modèle de Brinkman (1952)[22] : Par contre, Brinkman a élargi l'applicabilité de la formule pour la rendre plus complète. Il peut être appliqué à différentes concentrations et aussi il peut être utilisé dans un large éventail de volumes.

La relation de Brinkman est :

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}} \quad \text{II.6}$$

II.6.4 Chaleur spécifique :

La chaleur massique ou la chaleur spécifique est la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un système homogène $C_p = \frac{dQ}{mdT}$.

La chaleur spécifique correspond à l'apport de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de substance de 1 K lors de la transformation considérée [18]. Les modèles qui peuvent être utilisés pour déterminer la chaleur spécifique d'un nano fluide comprennent les deux modèles suivantes :

A. Modèle du Pak et Cho [23]

Pak et Cho (1998) ont utilisé la formule suivante:

$$(C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(C_p)_f + \varphi(C_p)_s \quad \text{II.7}$$

B. Modèle du Xuan et Roetzel [24]

Xuan et Roetzel (2000) ont utilisé la formule suivante:

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_s \quad \text{II.8}$$

II.6.5 La masse volumique (ρ) :

Pour déterminer la densité d'un nano fluide parfaitement homogène et bien dispersé, il faut considérer la fraction volumique à une température donnée. Ceci peut être réalisé en appliquant la définition de la masse volumique d'un mélange.

Lorsqu'il s'agit d'un mélange, la densité peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\rho_{nf} = \left[\frac{m}{v} \right]_{nf} = \frac{m_f + m_s}{V_f + V_s} = \frac{\rho_f V_f + \rho_s V_s}{V_f + V_s} \quad \text{II.9}$$

A partir de la relation II.7, on déduit alors la masse volumique du nano fluide :

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_s \quad \text{II.10}$$

Avec :

ρ_{nf} : La masse volumique du nano fluide.

ρ_f : La masse volumique du fluide de base.

ρ_s : La masse volumique des nanoparticules.

II.6.6 Coefficient d'expansion volumique (β) :

Pour calcul la valeur de ce coefficient pour les nano fluides, de très nombreux auteur ont utilisé à la suite des premiers travaux sur les nano fluides et par analogie avec la relation.

[25]

On déduit l'expression suivante:

$$\beta_{nf} = (1 - \varphi)\beta_f + \varphi\beta_s \quad \text{II.11}$$

Avec :

β_{nf} : Le coefficient de dilatabilité du nano fluide.

β_f : Le coefficient de dilatabilité du fluide de base.

β_s : Le coefficient de dilatabilité des nanoparticules.

II.7 Domaines d'application des nano fluides

Les nano fluides peuvent être employé pour l'amélioration de transfert de chaleur et l'efficacité énergétique dans plusieurs systèmes thermiques, dans cette contexte quelques exemples d'application seront présentées tel que le transport, la micro-électronique, le nucléaire, et la biomédicale.

II.7.1 Utilisation des nano fluides dans le domaine du froid

Les transferts de chaleur constituent la base des systèmes de production de froid et de climatisation. L'intensification des échanges de chaleur permettent d'améliorer les performances globales de ces systèmes. Dans les systèmes de réfrigération, l'effort est d'améliorer l'efficacité du système en introduisant des nanoparticules dans les réfrigérants (nano réfrigérant) et dans les huiles lubrifiantes (nano lubrifiants) Dans cette section [26].

Quelque exemples d'application seront présentés tel que le transport.

II.7.2 Refroidissement des systèmes thermiques

Le mélange d'éthylène-glycol et l'eau, sont utilisés comme liquide de refroidissement dans les moteurs des véhicules. L'addition des nanoparticules dans ces liquides améliore le taux de refroidissement [27].

II.7.3 Refroidissement des systèmes électroniques

Un nano fluide à base d'eau est rempli pour refroidir une unité centrale de calcul ou de traitement de haute performance (HPC).

II.7.4 Refroidissement des systèmes nucléaires

L'utilisation des nano fluides sur la sûreté neutronique, et la performance économique des systèmes nucléaires. Les nano fluides peuvent être utilisés comme fluide de refroidissement du réacteur principal pour les réacteurs à eau sous pression. Cela pourrait permettre des augmentations significatives de puissance dans les réacteurs à eau sous pression, améliorant ainsi leur performance économique [26]

II.8 Avantages et inconvénients des nano-fluides

II.8.1 Les avantages de nano fluides [15]

Parmi les avantages des nano fluide on cite :

- Une surface étendue pour le transfert de chaleur qui facilite l'échange d'énergie thermique entre les fluides et les particules.
- Pour obtenir une intensification égale du transfert de chaleur, une réduction est effectuée par rapport au liquide pur.
- Les concentrations de particules peuvent être ajustées pour obtenir des propriétés spécifiques telles que la conductivité thermique et la mouillabilité de surface, ce qui la rend adaptée à diverses applications.
- Particules réduites de colmatage par rapport aux conventionnelles boues, favorisant ainsi la miniaturisation du système.
- Haut dispersion et stabilité avec prédominante mouvement brownien des particules.

II.8.2 Inconvénients des nano-fluides

Parmi les inconvénients des nano fluide on cite :

- Coût élevé : Les nano fluides peuvent être coûteux à produire en raison du coût élevé des nanoparticules utilisées. Cela peut rendre les nano fluides plus chers que les fluides conventionnels.[15]
- stabilité des nanoparticules dispersion.
- Un problème fréquemment rencontré dans ce domaine est l'absence de consensus entre les chercheurs concernant leurs conclusions.[28]

- Les résultats variables des chercheurs peuvent être attribués au manque de compréhension théorique des mécanismes qui entraînent des changements de propriétés.[28]
- Compatibilité avec les matériaux : Les nanoparticules peuvent être corrosives pour certains matériaux. Les nano fluides peuvent donc ne pas être compatibles avec certains types de matériaux, ce qui peut limiter leur utilisation.[15]
- Difficultés dans le processus de production

II.9 Nano fluide (MWCNTs / huile de transformateur)[30]

Dans notre simulation pour obtenir les meilleurs résultats, nous allons utiliser un type spécial de nanoparticules (MWCNT) avec des attributs spéciaux et mélangé avec le transformateur d'huile pour obtenir un nano fluide.

Le MWCNT signifie des nanotubes de carbone à parois multiples, et la raison du choix de ces nanoparticules est la conductivité thermique intrinsèque élevée par rapport aux autres nanoparticules. Entre les deux nano fluides étudiés, les performances thermiques et électriques des MWCNTs fonctionnalisés de manière covalente étaient meilleures en raison de la plus forte augmentation du coefficient de transfert de chaleur du transfert libre et l'utilisation d'un ventilateur était liée aux MWCNTs fonctionnalisés de manière covalente, qui ont augmenté de 26,23% et 30,08%, respectivement. Aussi, en mesurant la tension de claquage.

Il a été constaté que les MWCNT de 0,001 % en poids présentaient la réduction la plus faible par rapport au fluide de base et étaient égales à 55,6 kV, ce qui présentait de bonnes performances car la norme spécifiée pour l'huile de transformateur propriété de tension de claquage est comprise entre 30 kV et 70 kV. Selon les résultats, le nano fluide MWCNT fonctionnalisé de manière covalente / huile de transformateur a de meilleures performances thermiques que l'huile pure, ce qui empêche le transformateur de monter en température et peut également être utilisé comme isolant électrique dans les transformateurs.

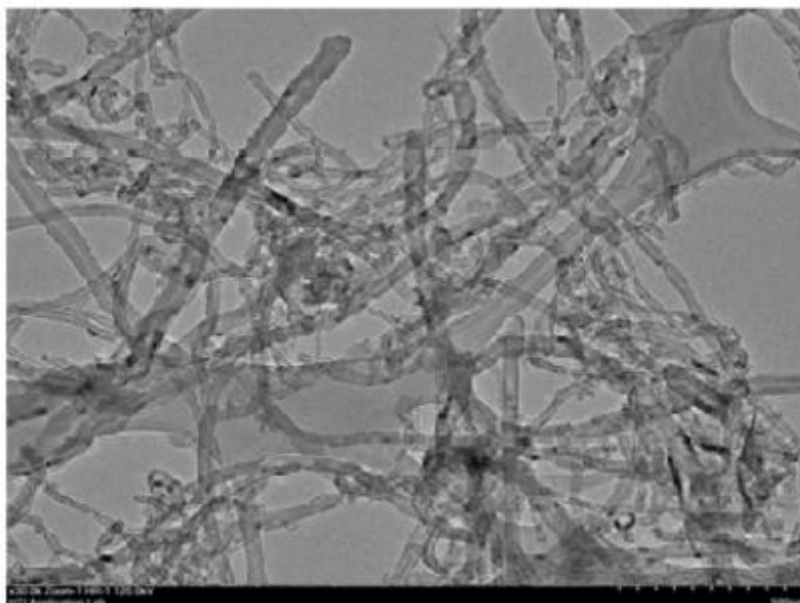


Figure II .7 : photo microscopie de MWCNTs

II.10 Conclusion

Ce chapitre a exploré les généralités sur les nano fluides, en se concentrant sur un type spécifique composé de nanotubes de carbone multi-parois (MWCNTs) mélangés à de l'huile de transformateur. Les composants des nano fluides, tels que les nanoparticules, les liquides de base et les additifs, ont été examinés en détail, ainsi que les méthodes de fabrication et de dispersion des nanoparticules. Les propriétés thermophysiques des nano fluides, telles que la conductivité thermique et la viscosité, ont été soulignées pour leurs avantages dans des domaines d'application variés tels que l'électronique, l'industrie de l'énergie et la mécanique des fluides. Cependant, il a été noté que l'utilisation des nano fluides présente des inconvénients potentiels tels que la stabilité à long terme et les préoccupations environnementales liées à la dispersion des nanoparticules. En résumé, ce chapitre a fourni une vue d'ensemble des nano fluides, en mettant en évidence les propriétés, les avantages et les limites spécifiques du nano fluide composé de MWCNTs et d'huile de transformateur. Il a souligné l'évolution continue de ce domaine de recherche et d'application, offrant de nouvelles perspectives pour l'innovation dans divers secteurs industriels.

Chapitre III

*Modélisation
Multiphysique
des Transformateurs*

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les modèles mathématiques qui décrivent les phénomènes multiphysiques impliqués dans le processus de refroidissement des transformateurs, en mettant un accent particulier sur la magnétohydrodynamique (MHD). Nous allons également étudier les méthodes de résolution utilisées pour résoudre ces équations.

En utilisant les équations de Maxwell et les lois constitutives du milieu, nous pouvons déterminer les paramètres électromagnétiques spécifiques à chaque problème. Pour l'aspect hydrodynamique, nous nous baserons sur l'équation de Navier-Stokes, en prenant en compte des propriétés telles que la densité de charge et la viscosité du fluide, afin d'analyser les variations de vitesse d'écoulement et de température lors du refroidissement d'un transformateur.

En résumé, ce chapitre présente les modèles mathématiques essentiels pour décrire les phénomènes multiphysiques associés au refroidissement des transformateurs. Les équations de Maxwell et de Navier-Stokes, ainsi que les lois constitutives du milieu, sont utilisées pour déterminer les paramètres électromagnétiques ainsi que les variations de température et de vitesse d'écoulement. Le couplage entre ces équations est réalisé en incorporant des termes sources et des flux convectifs.

III.2 Les Phénomènes Multiphasique

Dans ce qui va suivre les équations mathématiques qui sont utilisées pour modéliser le système de refroidissement électrique, en prenant en compte les phénomènes couplés de l'électromagnétisme et de l'hydrodynamique. Ces équations incluent les équations de Maxwell pour l'électromagnétisme et les équations de Navier-Stokes pour l'hydrodynamique. De plus, certaines hypothèses sont formulées afin de simplifier ces équations.[31]

III.2.1 Phénomène électromagnétique

Le phénomène électromagnétique dans le transformateur se réfère à l'ensemble des interactions et des effets électriques et magnétiques qui se produisent à l'intérieur de cet appareil. Il est principalement caractérisé par le flux magnétique créé par le courant électrique qui circule à travers les enroulements primaires du transformateur. Ce flux magnétique induit à son tour des tensions électriques dans les enroulements secondaires, permettant ainsi la transformation de l'énergie électrique d'un niveau de tension à un autre.

Le phénomène électromagnétique dans le transformateur est régi par les lois de l'électromagnétisme, notamment les équations de Maxwell, qui décrivent les relations entre les champs électriques et magnétiques, les courants et les charges électriques.

Ces équations permettent de modéliser et de comprendre les phénomènes complexes liés aux transferts d'énergie et aux propriétés magnétiques dans le transformateur. [32]

III.2.2 Equations de Maxwell [33]

Les équations de Maxwell sont un ensemble de quatre équations fondamentales qui décrivent les phénomènes électromagnétiques dans le cadre de la théorie électromagnétique de Maxwell. Ces équations sont les suivantes :

- L'équation de Gauss pour le champ électrique
- L'équation de Gauss pour le champ magnétique
- La loi de Faraday
- La loi d'Ampère-Maxwell

Ces équations de Maxwell fournissent une description mathématique précise des relations entre les champs électriques et magnétiques, les courants et les charges électriques, et sont essentielles pour modéliser et comprendre les phénomènes électromagnétiques dans divers systèmes, y compris les transformateurs électriques.

Les équations de Maxwell sont intervenir les grandeurs suivantes :

\vec{E} : Le champ électrique [v. m-1].

\vec{B} : L'induction magnétique [T]

\vec{D} : La densité de flux électrique [c. m-3]

\vec{H} : Le champ magnétique [A. m-1]

\vec{j} : La densité de courant d'électrique [A. m-2].

ρ : La densité de charge électrique [c. m-3]

Pour commencer nous adopterons le point de vue des praticiens de la Physique qui considèrent $\vec{E}, \vec{B}, \vec{D}, \vec{H}$ et \vec{j} comme des champs de vecteurs de l'espace, pouvant varier au cours du temps, et ρ comme une grandeur scalaire dont la valeur peut varier en fonction du point de l'espace considéré et du temps.

La première équation de Maxwell permet d'expliciter le lien entre le champ électrique source et les charges électrostatiques (Equation de maxwell-Gauss) :

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad \text{III.1}$$

Le flux \vec{D} à travers une surface fermée, est proportionnel à la charge électrique contenu.

La deuxième équation est le lien entre le champ électrique et l'induction magnétique :(Equation de maxwell-faraday)

$$\operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{III.2}$$

La troisième équation de Maxwell représente la loi de conservation de flux de l'induction magnétique :

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad \text{III.3}$$

La dernière équation représente la conservation de la charge électrique pour un courant électrique (Equation de maxwell-Ampère) :

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{III.4}$$

III.2.2.1 Formes intégrales des équations de Maxwell

Nous constatons que, dans la plupart des phénomènes physiques, les grandeurs locales sont souvent associées à des expressions intégrées des équations de la physique. De même, les grandeurs généralement mesurables, telles que la force, la puissance thermique, la tension ou le courant, sont elles-mêmes des grandeurs intégrées

Ces équations montrent notamment qu'en régime stationnaire, les champs électrique et magnétique sont indépendants l'un de l'autre, alors qu'ils ne le sont pas en régime variable. Dans le cas le plus général, il faut parler du champ électromagnétique.

Alors il est indispensable d'imposer des équations liées aux lois constituées des matériaux et cela pour déterminer les différentes \vec{E} , \vec{B} , \vec{D} , \vec{H} et \vec{J} qui sont approximativement variable dans beaucoup des matériaux.

$$\oiint \vec{E} d\vec{s} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad \text{III.5}$$

$$Q = \iiint \rho dv \quad \text{III.6}$$

Ce principe, connu sous le nom de théorème de Gauss, énonce que le flux du champ électrique à travers une surface fermée est égal à la somme des charges électriques à l'intérieur de cette surface, divisée par la constante ϵ_0 . Cela signifie que le champ électrique peut diverger à partir de points où des charges électriques sont présentes. Ainsi, le théorème de Gauss reste valable même lorsque le régime est variable.

III.2.2.2 Equation de maxwell-faraday

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad \text{III.7}$$

$$\phi = \iint \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad \text{III.8}$$

Cette équation décrit tous les phénomènes d'induction et montre qu'un champ magnétique variable peut créer un champ électrique à circulation non nulle.

III.2.2.3 Loi de conservation de flux de l'induction magnétique

$$\oiint \vec{E} \cdot d\vec{s} = 0 \quad \text{III.9}$$

Précise sa signification : Le flux de B travers toute surface fermée est nul. C'est une propriété intrinsèque de B qui montre que le champ magnétique ne peut diverger à partir de points de l'espace, ou encore qu'il n'existe pas de charges magnétiques. Nous retrouvons là en fait la même équation qu'en régime stationnaire.

III.2.2.4 Equation de Maxwell-Ampère

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \iint \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{s} \quad \text{III.10}$$

$$I = \iint \vec{j} \cdot d\vec{s} \quad \text{III.11}$$

En régime stationnaire, nous retrouvons le théorème d'Ampère qui montre que le champ \vec{B} tourne autour des courants. Le terme supplémentaire en $\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ indique qu'un champ électrique variable est source de champ magnétique.

Elles relient entre elles les champs, charges et courants introduits ci-dessus et sont habituellement dépendantes de la fréquence

$$\vec{D} = (\omega, P, T) \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu (\omega, P, T) \vec{H}$$

$$\vec{J} = \vec{J}_{ex} + \sigma (\omega, P, T) \vec{E}$$

Où les tenseurs ϵ , μ , σ sont la permittivité, électrique, la perméabilité magnétique et la conductivité électrique respectivement et qui dépendent, entre autres, de la fréquence (ils peuvent aussi dépendre de la position, de la température, de la pression, etc.). Les éléments de ces tenseurs sont complexes, ce qui entraîne bien sur un déphasage entre \vec{D} et \vec{E} , \vec{B} , \vec{H} , \vec{J} .

Il est également possible que les matériaux présentent un comportement non linéaire. Cependant, dans la plupart des cas en exploration électromagnétique, les propriétés physiques des matériaux peuvent être simplifiées en faisant certaines hypothèses. Ces hypothèses incluent le fait que tous les milieux sont linéaires, isotropes et homogènes, et que leurs propriétés physiques ne varient qu'en fonction de la fréquence. [34]

✓ Relation magnétique

Pour les matériaux diamagnétiques, la relation entre B et H est linéaire et de la forme :

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r H \quad \text{III.12}$$

Avec :

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide égale à $4.\pi.10^{-7}$ [H/m]

μ_r : Perméabilité relative du matériau considéré [H/m]

Pour les matériaux ferromagnétiques, si l'on néglige le phénomène d'hystérésis, il est possible d'exprimer ' \vec{B} ' par une fonction univoque de la forme :

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

μ : est une fonction du module de H [H/m].

Dans le cas de matériaux durs (aimants permanents), seule la partie utile du cycle d'hystérésis est considérée, celle-ci peut être modélisée par la relation :

$$\vec{B} = \mu_a \vec{H} + \vec{B}_r \quad \text{III.14}$$

μ_a : Perméabilité de l'aimant

B_r : induction rémanent de l'aimant [T]

Dans le vide et même dans l'air l'induction et le champ magnétique, ainsi que l'induction et le champ électriques sont liée par :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad \text{III.15}$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad \text{III.16}$$

ϵ_0 : Permittivité diélectrique à vide égale à $10^{-9}/36 \pi$ [F/m].

III.2.3 Loi d'Ohm généralisé

Une troisième équation essentielle relie le champ électrique et la densité de courant par l'intermédiaire électrique σ :

$$\vec{J} = \vec{J}_{ex} + \sigma \vec{E} + \sigma (\vec{V} \wedge \vec{B}) \quad \text{III.17}$$

Avec :

\vec{V} : vitesse au point considéré [m/s]

$\sigma \vec{E}$: Densité des courants induits des champs électriques E [A/m²].

$\sigma (\vec{V} \wedge \vec{B})$: Densité des courants induits résultant au mouvement E [A/m²].

En repos, en absence de mouvement la loi d'ohm donne comme suit

$$\vec{J} = \vec{J}_{ex} + \sigma \vec{E} \quad \text{III.18}$$

Avec :

σ : La conductivité électrique [Ω/m]

III.2.4 Conditions de passage entre milieux

Lorsqu'il y a une interface entre deux milieux ayant des propriétés électromagnétiques différentes, il est possible que les grandeurs électromagnétiques présentent une discontinuité à cette interface. Les conditions de passage (ou de transmission) sont utilisées pour exprimer les relations entre ces grandeurs aux frontières.

L'étude d'une structure comportant plusieurs régions homogènes consiste d'abord à déterminer les champs électromagnétiques dans chaque région en utilisant les équations de Maxwell locales. Ensuite, les conditions aux limites sont appliquées en utilisant les équations de Maxwell dans leur forme globale.

On définit une surface ou un volume de part et d'autre de l'interface de séparation, puis les équations de Maxwell sont appliquées sous forme intégrale pour tenir compte des interactions à cette interface.

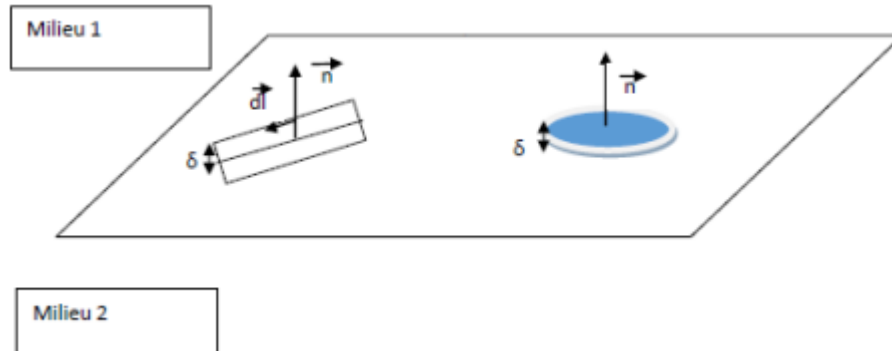


Figure III.1 : Surface et volume d'intégration entre deux milieux.

On fait prendre δ vers zéro et on prend la limite des intégrales. Ceci fournit des relations entre certaines composantes des champs de part et d'autre de l'interface

III.2.4.1 Conditions sur les composantes tangentielles

Lorsque nous appliquons les relations intégrales à la surface située à gauche dans la figure (III .1), à mesure que la hauteur du contour tend vers zéro, l'aire intérieure devient négligeable, de même que les flux des champs \vec{B} et \vec{D} . Cependant, la contribution de la densité de courant ne s'annule pas lorsque le produit limite de $J_x \delta$ donne le courant de surface J_s . Étant donné que la surface d'intégration a été choisie de manière arbitraire par rapport à la surface de séparation, la condition limite doit rester valable indépendamment de l'orientation, ce qui implique que :

$$\vec{n}_{12} * (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) = \vec{J}_S \quad \text{III.19}$$

$$\vec{n}_{12} * (\vec{E}_1 - \vec{E}_2) = 0 \quad \text{III.20}$$

Le vecteur n est perpendiculaire à la surface de séparation, s'étendant du milieu 2 vers le milieu 1, et où \vec{J}_S est la densité de courant de surface, qu'il ne faut pas confondre avec la densité volumique de courant \vec{J}_S qui apparaît dans les équations de Maxwell.

Les composantes du champ électrique parallèles à la surface entre deux milieux sont toujours continues de part et d'autre de la surface. Cependant, les composantes parallèles du champ magnétique présentent une discontinuité lorsque qu'une densité surfacique de courant \vec{J}_S circule à travers la surface de séparation.

III.2.4.2 Conditions sur les composantes normales

En intégrant les équations sur la surface de droite représentée dans la figure et en faisant tendre δ vers zéro, les contributions du volume et des parois latérales s'annulent, ne laissant que la charge de surface. Étant donné que les relations doivent être valables pour n'importe quel volume choisi, on obtient les relations suivantes pour les composantes normales.

$$\vec{n}_{12} * (\vec{D}_1 - \vec{D}_2) = \rho_S \quad \text{III.21}$$

$$\vec{n}_{12} * (\vec{B}_1 - \vec{B}_2) = 0 \quad \text{III.22}$$

Lorsqu'il y a une densité de charge de surface ρ_S , la composante normale du champ magnétique \vec{B} est toujours continue, tandis que la composante normale du champ de déplacement \vec{D} est discontinue.

III .2.5 Conditions aux limites naturelles

Les valeurs d'un champ X à la frontière du domaine obéissent principalement à deux relations simples. Elles peuvent être soit fixées à des valeurs connues, soit être perpendiculaires à la surface, ce qui se traduit par :

III .2.5.1 Conditions aux limites spatiales et temporelles

Les valeurs d'un champ U aux frontières peuvent satisfaire principalement deux conditions simples [14], Ainsi aux limites du domaine, ce champ peut être soit normal (Domaine symétrique) (III-23), soit de valeur connue (III-24), ce qui se traduit par :

$$\text{Condition de Neumann : } \frac{dU}{dt} = 0 \quad \text{III-23}$$

$$\text{Condition de Dirichlet : } U = 0 \quad \text{III-24}$$

Les conditions aux limites temporelles sont en général fixées à des valeurs nulles à l'instant initial. [35]

III.2.6 Conditions de Jauge

Les relations constitutives des matériaux, les conditions de passage et les conditions aux limites ne sont pas suffisantes pour garantir l'unicité d'une solution dans la résolution des équations de Maxwell. L'utilisation de jauges est nécessaire pour résoudre ces équations.

Les champs impliqués dans les équations de Maxwell ne sont définis qu'à un gradient (champ avec rotationnel) ou près d'un rotationnel (champ avec divergence).

Selon la formulation choisie et le type d'éléments de discrétisation, certaines conditions de jauge sont utilisées.

Alors, les principales jauges sont :

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

$$\nabla \cdot U + K \frac{dU}{dt} = 0 \quad (\text{Jauge de Lorentz})$$

III .2.7 Différentes Formulations Electromagnétiques

Dans le cas général, le domaine de modélisation d'un problème magnétodynamique est composé (voir Figure III.2) : d'une zone inductrice Ω_1 traversée par une densité de courant J_0 , d'une région conductrice simplement connexe Ω_2 , d'une région conductrice à connexité multiple Ω_3 , ou d'une région mince Ω_4 où des courants induits se produisent.

Le domaine comprend également des régions ferromagnétiques isolantes simplement connexes (Ω_5) ou à connexité multiple (Ω_6).

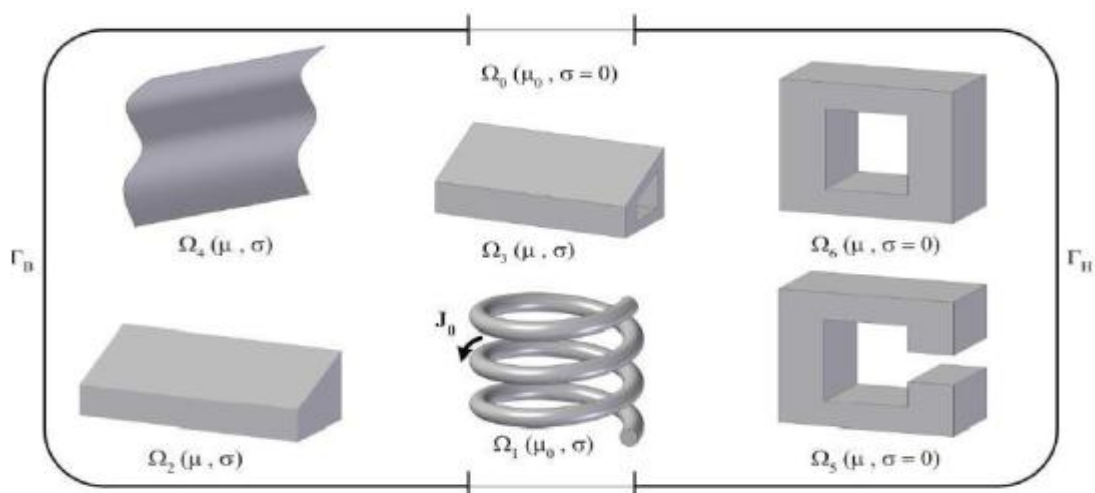


Figure III.2 : Domaine d'étude générique d'un problème magnétodynamique

Le domaine d'étude Ω englobe ces régions distinctes ainsi que celle du milieu environnant Ω_0 . Il est notamment limité par des frontières Γ_B , Γ_H , sur lesquelles sont annulées respectivement la composante normale de l'induction magnétique et la composante tangentielle du champ magnétique.

La résolution du problème électromagnétique quasi stationnaire, dans le domaine Ω , nécessite le choix d'une formulation basée sur une grandeur caractéristique et en association avec les relations constitutives, les relations de passage, les conditions aux limites et les conditions de jauge. On distingue deux catégories de formulations basées soit sur le champ électrique E , soit sur le champ magnétique H . La première catégorie inclut surtout la formulation en potentiel vecteur magnétique A et ses variantes. La deuxième catégorie comprend des formulations en H ou la formulation en T - Ω [36].

II .2.7.1 Phénomène Electrostatique

La source du champ électrostatique est constituée par des charges fixes (C'est-à-dire que le terme $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ est nul).

Le champ électrique :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{grad}V \quad \text{III.25}$$

Et l'équation (III-2) devient :

$$\overrightarrow{Rot} \vec{E} = 0 \quad \text{III.26}$$

Dans le référentiel d'étude les équations correspondants sont (III-20), (III-1) et (III-10)

Le modèle se ramène alors à l'équation suivante :

$$Div(\overrightarrow{\epsilon grad}V) - \rho = 0 \quad \text{III.27}$$

L'inconnue, qui est une grandeur scalaire V , impose ainsi le calcul d'une seule valeur à chaque point. Lorsque les conditions aux limites du problème à étudier sont formulées en termes de V ou de sa dérivée normale, cela garantit l'unicité de la solution

II .2.7.2 Formulation du modèle magnétostatique

➤ Formulation en potentiel vecteur magnétique A

Dans le modèle précédent, nous supposons que le champ magnétique est généré par des sources indépendantes du temps, ce qui rend le terme $\partial B/\partial t$ nul et permet une séparation entre le champ électrique \vec{E} et magnétique \vec{H} . Cependant, si nous souhaitons modéliser un objet parcouru par des courants non nuls, les équations obtenues sont les suivantes : (III-3), (III-4) et (II-14).

L'équation (III-3) permet de définir une fonction vectorielle A , appelée potentiel vecteur magnétique, de telle sorte que nous avons :

$$\vec{B} = \overrightarrow{rot} \vec{A} \quad \text{III.28}$$

Pour que A soit totalement défini, on doit fixer sa divergence en utilisant la gauge de coulomb :

$$Div \vec{A} = 0 \quad \text{III.29}$$

D'après ces équations on obtient :

$$\overrightarrow{rot} \left(\mu_1 \overrightarrow{rot} (\vec{A}) \right) = \vec{J} + \overrightarrow{rot} \left(\frac{\vec{B}_r}{\mu} \right) \quad \text{III.30}$$

➤ Formulation en potentiel scalaire magnétique total : Φ_t

En l'absence de toute source de courant dans une région donnée, le rotationnel du champ magnétique est nul, ce qui implique que le champ magnétique est irrotationnel. De plus, lorsque les champs ne dépendent pas du temps, cela indique que le champ magnétique peut être exprimé en fonction d'un potentiel scalaire magnétique. :

$$\begin{aligned} div \vec{B} &= 0 \\ \overrightarrow{rot} \vec{H} &= 0 \end{aligned} \quad \text{III.31}$$

Cela correspond aux dispositifs pour lesquels les champs sont générés par des forces magnétomotrices extérieures qui sont indépendantes du dispositif étudié. Cela peut également être le cas des dispositifs utilisant des aimants permanents, pour lesquels la loi qui régit le champ magnétique est la suivante :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \text{III.32}$$

Cette relation implique qu'il existe une fonction ϕ potentielle scalaire magnétique telle que :

$$\vec{H} = -\overrightarrow{\text{grad}}\phi t \quad \text{III.33}$$

On obtient alors :

$$(\mu \vec{H}) = 0 \quad \text{III.34}$$

$$\text{div}(\mu(\overrightarrow{\text{grad}}\phi t)) = 0 \quad \text{III.35}$$

➤ **Remarque**

L'inconnue Φt représente un seul inconnu par point, ce qui permet de réduire les coûts de calcul. Cependant, cette formulation présente l'inconvénient d'être uniquement applicable dans les régions simplement connexes.

II .2.7.3 Formulation du modèle magnétodynamique

Avec le modèle magnétodynamique, les champs \vec{E} (champ électrique) et \vec{H} (champ magnétique) sont liés par la loi d'induction. Ainsi, les quatre équations de Maxwell interviennent dans la description des phénomènes électromagnétiques. Des courants induits se manifestent dans les conducteurs en réponse au champ électromoteur \vec{E} , qui est lui-même issu de la loi d'induction (équation de Maxwell-Faraday).

➤ **Formulation en potentiel vecteur magnétique A associé au besoin en potentiel scalaire électrique V**

$$\overrightarrow{\text{div}}\vec{B} = 0 \quad \text{III.36}$$

L'équation de conservation du flux permet d'introduire le potentiel vecteur magnétique A tel que :

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}}\vec{A} \quad \text{III.37}$$

On a : quel que soit le scalaire V :

$$\overrightarrow{\text{Rot}}(\overrightarrow{\text{grad}}V) = 0 \quad \text{III.38}$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \overrightarrow{\text{rot}}(\overrightarrow{\text{grad}}V) \quad \text{III.39}$$

$$\overrightarrow{rot}\vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t}(\overrightarrow{rot}\vec{A}) - \overrightarrow{Rot}(\overrightarrow{grad}V) \quad \text{III.40}$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial\vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{grad}V \quad \text{III.41}$$

D'après l'équation de Maxwell-Ampère (III-4) et l'équation (III-18):

$$\overrightarrow{rot}\left(\frac{1}{\mu}\overrightarrow{rot}(\vec{A})\right) + \sigma\left(\frac{\partial\vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{grad}V\right) = \vec{J}_{ex} \quad \text{III.42}$$

Pour prendre en compte les deux inconnues, le couple (A.V),

Il est nécessaire d'ajouter une deuxième équation basée sur la conservation de la densité de courant induite dans un matériau conducteur. Cette équation différentielle peut être formulée de la manière suivante :

$$\overrightarrow{Div}\vec{J}_{ind} = 0 \quad \text{III.43}$$

On obtient la deuxième équation, d'où le système d'équation à résoudre

$$\overrightarrow{rot}\left(\frac{1}{\mu}\overrightarrow{rot}(\vec{A})\right) + \sigma\left(\frac{\partial\vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{grad}V\right) = \vec{J}_{ex} \quad \text{III.44}$$

$$\overrightarrow{Div}\left[\sigma\left(\frac{\partial\vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{grad}V\right)\right] = 0 \quad \text{III.45}$$

Si les sources d'excitation sont de nature alternative avec une pulsation ($\omega = 2\pi f$), il est possible d'utiliser la représentation de Fresnel pour modéliser leur variation temporelle. En utilisant les nombres complexes, on peut alors remplacer le terme :

$$\frac{\partial\vec{A}}{\partial t} = j\omega\vec{A} \quad \text{III.46}$$

III.3 Modèle Thermique

La génération et la localisation des pertes d'énergie se produisent sur plusieurs composants. Les pertes dans les transformateurs peuvent être attribuées à la fois aux conducteurs magnétiques (pertes dans le fer) et à d'autres facteurs. Dans la plupart des cas, les conducteurs électriques connaissent une augmentation principalement due à l'effet Joule. Dans les prochains paragraphes, nous discuterons de la température des transformateurs. Les phénomènes thermiques à l'origine de ces pertes sont décrits comme résultant de la conduction entre les deux surfaces. Les parties conductrices du transformateur peuvent générer un mouvement par convection dans l'entrefer. Le rayonnement dans l'atmosphère environnante est un phénomène bien connu. L'une des méthodes les plus répandues de

transmission de la chaleur passe par ce processus. L'échange naturel d'énergie a lieu entre les deux systèmes. Quel que soit le milieu, y compris le vide, il existe une différence de température qui existe entre eux.

La distinction entre ce fait dans les sciences pures et son application est plus apparente que dans tout autre domaine. Les technologies jouent un rôle essentiel dans de nombreux cas. Ce rôle devient même déterminant lorsque ces transferts sont à l'origine des techniques utilisées. [37]

III.3.1 Transfert de chaleur par conduction

La conduction thermique (ou diffusion thermique) est un mode de transfert d'énergie qui se fait à l'échelle microscopique. Dans les solides non métalliques, le transfert de l'énergie entre deux zones de températures différentes se fait par échange d'énergie de vibration entre les atomes du réseau cristallin. Dans les métaux, l'énergie thermique est aussi transportée par les électrons de conduction, ce qui rend le transfert plus efficace. La conduction thermique est rapide sur des petites distances, mais très lente sur les grandes distances. Prenons l'exemple de la figure II.2, d'un barreau soumis à deux températures T_1 et T_2 à ses extrémités.

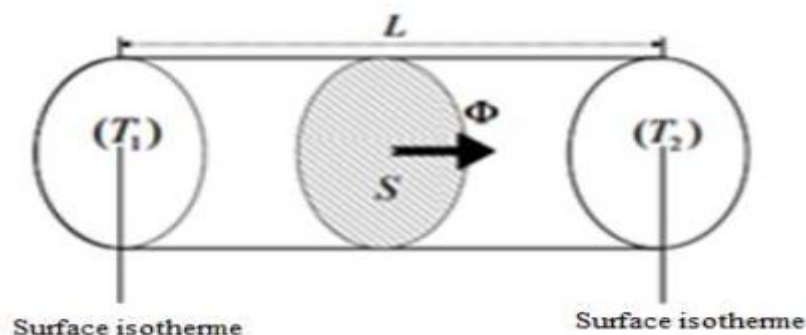


Figure III.3 : conduction de la chaleur dans un barreau [38]

Une autre expression pour le flux de chaleur Φ [W] qui se produit entre les deux extrémités du barreau peut être formulée de la manière suivante :

$$\Phi = \frac{\lambda}{L} S (T_1 - T_2) \quad \text{III.47}$$

Avec L la longueur du barreau, S sa section et T_1 , T_2 les températures à ses extrémités et λ conductivité thermique.

La théorie de la conduction obéit à la loi dite de Fourier établie mathématiquement par Jean-Baptiste Biot en 1804 puis expérimentalement par Fourier en 1822 : la densité du flux est proportionnelle au gradient de la température.

$$Q = -\lambda \text{grad}T \quad \text{III.48}$$

Avec :

Q : Densité du flux thermique. [$W/(m \cdot ^\circ K)$].

III.3.2 Transfert de chaleur par convection

La convection implique principalement le transfert d'énergie par le déplacement macroscopique d'une grande quantité de molécules, généralement d'un fluide, d'une région à une autre. Ce mécanisme est toujours accompagné d'un transfert d'énergie lié au mouvement moléculaire, qui représente le côté conductif de ce mode de transfert. On distingue deux types de convection : la convection naturelle (ou convection libre), où le mouvement des particules est induit par les différences de température imposées au fluide. Ces différences de température entraînent également des différences de densité (déplacement des particules, expansion), par exemple lors du chauffage de l'air dans une montgolfière ou du chauffage de l'eau dans un récipient. [39]

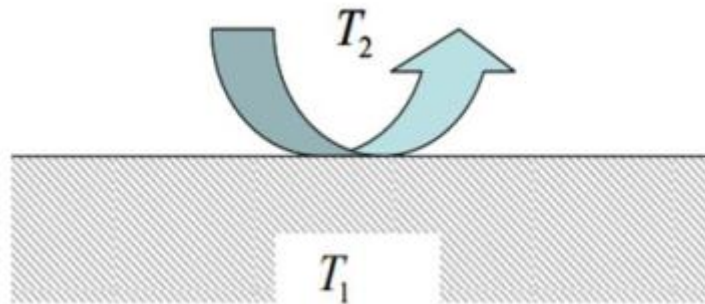


Figure III.4 : Principe de la convection

La formulation générale pour exprimer le flux de chaleur échangé entre la surface et le fluide en mouvement est la suivante :

$$\Phi = hS (T_1 - T_2) \quad \text{III.49}$$

Avec :

S : la surface d'échange entre le solide et le fluide en m^2

h : est le coefficient d'échange convectif qui s'exprime en $Wm^{-2}k^{-1}$

La complexité de ce mode de transfert de chaleur réside dans le calcul du coefficient d'échange h entre le fluide et le solide, qui résulte de deux phénomènes : la conduction et le mélange des particules à l'intérieur du fluide. Lorsque le mouvement du fluide est uniquement induit par les différences de température, on parle de convection naturelle. En revanche, lorsque le mouvement du fluide est induit par une action mécanique, on parle de convection forcée. Par conséquent, des notions de mécanique des fluides sont nécessaires pour résoudre un problème de convection. Il est clair d'après l'Équation II.44 que le coefficient d'échange h est inversement proportionnel à la différence de température entre le fluide et le solide. Ce coefficient h dépend principalement des propriétés physiques du fluide utilisé et de la géométrie du solide, et sa valeur augmente si la conductivité thermique du fluide augmente. [40]

III.3.3 Transfert de chaleur par rayonnement

Le rayonnement est un transfert de chaleur par lequel l'énergie électromagnétique se propage d'un milieu à haute température vers un autre milieu à basse température, sans nécessiter de support matériel (il peut se produire même dans le vide). En général, tout corps opaque ou partiellement opaque, porté à une température supérieure à zéro Kelvin, émet de l'énergie dans toutes les directions. Cette énergie est transportée sous la forme d'une onde électromagnétique, et sa propagation ne nécessite pas de support matériel. Le rayonnement implique un échange de chaleur entre deux surfaces séparées par un milieu transparent, comme illustré dans la Figure I.4. Ce flux peut être exprimé par la forme suivante :

$$\Phi = \varepsilon_{12} \sigma_s (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{III.50}$$

ε_{12} ; Est l'émissivité équivalente de l'ensemble paroi 1 – paroi 2 et σ_s la constante de Stefan. [39]

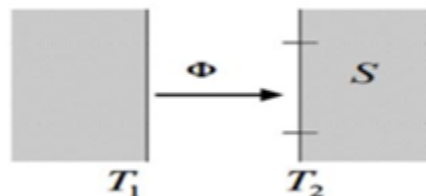


Figure III.5 : principe de rayonnement

III.4 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 III. 1 : Analogies entre la loi de Fourier et la loi d'Ohm [41]

Electrique	Thermique
Loi d'Ohm $U = RI$	Loi de Fourier $\Delta V = R \cdot I$
Conductivité électrique $\sigma(t)$	Conductivité thermique $\lambda(t)$
Potentiel électrique V	Température T
Intensité de courant I	Puissance thermique P
Résistance électrique R	Résistance thermique $\frac{L}{\lambda S}$

III .4.1 Couplage Electromagnétique et Thermique

La source de température donnée par l'équation de la chaleur provient des pertes par effet de Joule dans les systèmes (ex. les enroulements transformateurs). Si on ne prend pas en compte la dissipation visqueuse de la chaleur donc la puissance induite qui le résultat du travail des courants induits. Donc le terme source d'électromagnétisme dans l'équation thermique peut exprimer comme suit :

$$P = \frac{1}{2\sigma} J \cdot J^* \quad \text{III.51}$$

III .4.2 Bilan énergétique équation de diffusion de chaleur [40]

Lorsque les vitesses sont suffisamment faibles, on obtient l'équation classique en régime permanent.

$$\rho C_p \vec{V} \text{grad}(T) = -\text{div}Q + P - \phi \quad \text{III.52}$$

En substituant l'expression de Q dans l'équation (III-49), nous obtenons :

$$\rho C_p \vec{V} \text{grad}(T) = \text{div}(K \text{grad} T) + P - \phi \quad \text{III.53}$$

Avec :

$\rho C_p \vec{V} \text{grad}(T)$: représente la convection.

$\text{div}(K \text{grad} T)$: représente la conduction

$C\rho$: Chaleur massique [J/K0.kg].

P : terme source de chaleur correspondant.

K : conductivité thermique du milieu.

Φ : terme de rayonnement

En effectuant la transformation en coordonnées cartésiennes de l'équation thermique (III-53), nous obtenons :

$$\rho C \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) + \frac{1}{2\sigma} J \cdot J^* - \phi \quad \text{III.54}$$

III.5 Dynamique des Fluides

En physique, la dynamique des fluides est une sous-discipline de la mécanique des fluides qui traite de l'écoulement des fluides. La dynamique des fluides est l'un des domaines les plus importants de la physique. La vie telle que nous la connaissons n'existerait pas sans fluides et sans le comportement qu'ils présentent. L'air que nous respirons et l'eau que nous buvons (et qui constituent l'essentiel de notre masse corporelle) sont des fluides. La dynamique des fluides a de nombreuses applications, notamment le calcul des forces et des moments sur les avions (aérodynamique), la détermination du débit massique de l'eau par les conduites (hydrodynamique). [42]

III.5.1 Equations de Navier-stokes

Les équations de Navier-Stokes peuvent être employées pour la simulation des écoulements, bien que cela requière un grand nombre d'éléments pour capturer la large gamme d'échelles présentes dans ce type de flux. Le modèle de Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) est le plus couramment utilisé dans les applications industrielles de flux. En supposant que le fluide est newtonien, les équations de Navier-Stokes prennent la forme suivante.

Une fois que l'écoulement devient turbulent, toutes les quantités fluctuent dans le temps et l'espace. Obtenir des informations détaillées sur ces fluctuations devient extrêmement coûteux en termes de calcul et rarement utile. Par conséquent, il est souvent suffisant et utile d'obtenir une représentation moyenne du flux étudié. [40]

Les équations qui gouvernent le mouvement de tout fluide sont les suivantes :

- L'équation de la conservation de la quantité de mouvement.

$$\rho(\overrightarrow{V grad})\vec{V} = \vec{F} - \overrightarrow{grad}p + \eta\Delta\vec{V} + \frac{1}{3}\eta\overrightarrow{grad}[div(\vec{V})] \quad \text{III.55}$$

- L'équation de conservation de la masse.

Dans le cas générale, cette équation s'écrit :

$$\frac{d\rho}{dt} + div(\rho\vec{V}) = 0 \quad \text{III.5}$$

Dans le cas d'un fluide incompressible (huile) et en régime stationnaire elle réduite à :

$$div(\vec{V}) = 0 \quad \text{III.57}$$

Donc l'équation d'écoulement est représentée par le système :

$$div\vec{V} = 0$$

$$\rho(\overrightarrow{V grad})\vec{V} - \eta\Delta\vec{V} + \overrightarrow{grad}p = \vec{F} \quad \text{III.58}$$

III.6 Méthodes de Résolution

Ces méthodes permettent de résoudre directement les équations différentielles. Le domaine est discrétisé en un certain nombre de points nodaux où les fonctions inconnues sont évaluées. Avec les progrès de l'informatique, ces méthodes trouvent de nombreuses applications. Parmi les plus couramment utilisées, on peut citer la méthode des différences finies, la méthode des volumes finis et la méthode des éléments finis, qui sont les principaux sujets de ce travail.

III.6.1 Méthode des Éléments Finis (MEF)

La méthode des éléments finis fait partie des outils de mathématiques appliquées. En analyse numérique, la méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles. Celles-ci peuvent par exemple représenter analytiquement le comportement dynamique de certains systèmes physiques (mécaniques, thermodynamiques, acoustiques, etc.). En mathématique, Il s'agit de remplacer un problème compliqué pour lequel a priori on ne connaît pas de solution, par un problème plus simple que l'on sait résoudre.

La méthode des éléments finis (MEF) a d'abord été utilisée pour résoudre des équations d'élasticité et de mécanique des structures, puis elle a été adaptée à l'électromagnétisme. Elle a fait son apparition dans les années 70, après la méthode des différences finies (MDF). Cependant, son histoire remonte à l'année 1943. La MEF est une méthode générale qui s'applique à la plupart des problèmes rencontrés dans la pratique, qu'ils soient stationnaires ou non stationnaires, linéaires ou non linéaires, définis dans un domaine géométrique à une, deux ou trois dimensions. De plus, elle s'adapte bien aux milieux hétérogènes.

La méthode des éléments finis consiste à approximer les variables inconnues par des polynômes de degré fini aux nœuds du maillage. Les parties élémentaires du maillage sont des polygones, et en trois dimensions, des tétraèdres, des hexaèdres, des prismes, par exemple. Cette variété de formes d'éléments finis permet de mailler les régions avec une densité variable, ce qui est avantageux pour décrire les géométries conventionnelles par rapport aux différences finies. [43]

Les conditions aux limites peuvent être facilement prises en compte dans la méthode des éléments finis. De plus, cette méthode est décrite par une théorie mathématique très riche, ce qui permet de préserver les propriétés des opérateurs mathématiques. Cependant, la méthode des éléments finis nécessite un traitement particulier des équations, qui sont transformées à l'aide d'une formulation intégrale, puis discrétisées pour obtenir un système d'équations algébriques. La précision du calcul dépend de la finesse du maillage et du degré des polynômes utilisés. Les coefficients des polynômes ne dépendent que de la géométrie et de sa discrétisation. [40]

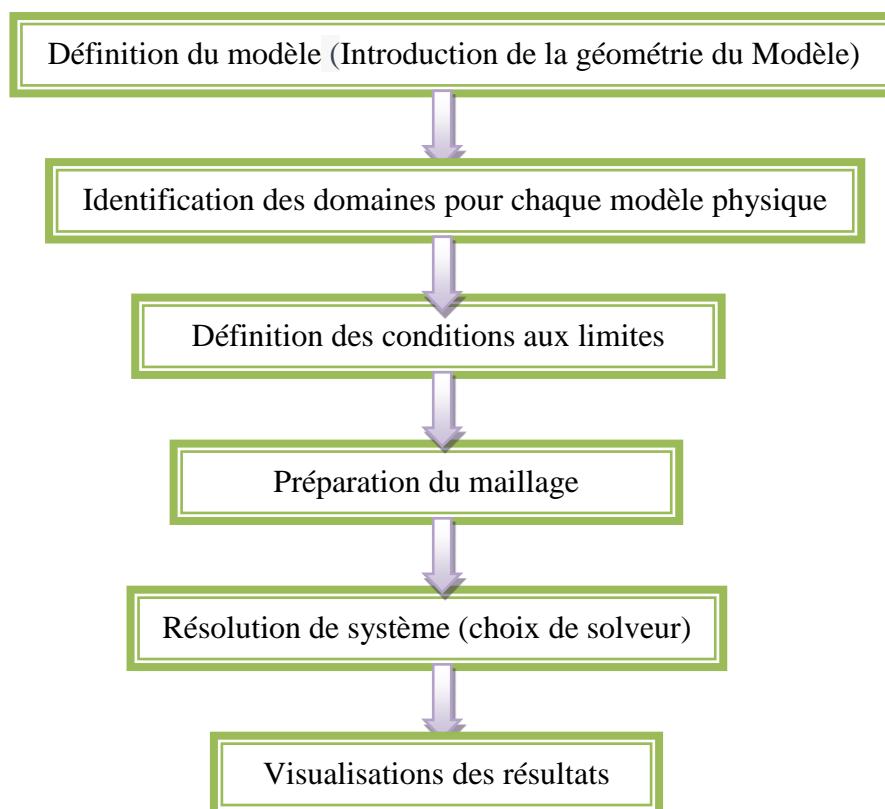
II.6.2 Etapes de la méthode des éléments finis

Les méthodes aux éléments finis se distinguent des différences finies par trois points principaux :

- Discrétisation du domaine
- Formulation intégrale des équations différentielles partielles.
- Choix des fonctions d'interpolation.
- Formation des matrices et vecteurs élémentaires.
- Assemblage.
- Résolution du système algébrique globale.

Actuellement, il existe plusieurs logiciels qui utilisent la méthode des éléments finis, tels que Femlab, Maxwell, Flux2D et FEMM. Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics version 5.6 Les étapes de résolution peuvent être résumées selon l'organigramme présenté dans le tableau suivant :

Tableau III. 2 : Diagramme de différentes étapes de résolution dans Comsol Multiphasiques



III.7.Présentation de Logiciel Comsol Multiphysics [44]

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique qui englobe toutes les étapes de 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. Il 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 de la suite de produits.

Disposant d'interfaces physiques prédéfinies, ce logiciel permet la simulation de plusieurs physiques et applications en ingénierie, et particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques. Multiplateforme et compatible avec Windows, Mac, Linux, le logiciel COMSOL Multiphysics autorise à l'utilisateur de définir ses propres systèmes

d'équations aux dérivées partielles (EDP), soit sous forme différentielle, soit sous formulation faible. Les couplages avec des équations aux dérivées ordinaires (EDO) et des équations algébro-différentiels (EAD) sont également possibles.

Des modules d'applications optionnels offrent des interfaces spécialisées notamment en mécanique linéaire et non linéaire, acoustique, écoulement, transfert de chaleur, génie chimique, géophysique, électromagnétisme basse et haute fréquence, corrosion, plasma, suivi de particules, optimisation, MEMS, ainsi qu'avec les logiciels de CAO et Matlab

III.8 Conclusion

L'étude du fonctionnement de certains systèmes électriques nécessite une approche combinant l'analyse électromagnétique et d'autres phénomènes associés, tels que la thermique et la dynamique. Dans ce chapitre, nous avons examiné en détail les différents modèles, tels que l'électromagnétisme, le modèle dynamique et thermique de transfert de chaleur, qui décrivent le modèle MHD.

Nous avons également étudié les différentes méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles qui décrivent ces phénomènes, en prenant en compte leurs interactions. Un modèle numérique basé sur la méthode des éléments finis a été rappelé pour résoudre le modèle mathématique en utilisant une approche directe. Cependant, il est rare de pouvoir résoudre analytiquement ces phénomènes, sauf pour des cas simples, en raison de la complexité de la géométrie et des couplages. Par conséquent, nous préférons systématiquement utiliser la méthode des éléments finis (MEF) dans notre travail, car elle fournit des résultats de calcul avec une grande fiabilité, même pour des géométries complexes et des phénomènes physiques variés. En effet, la modélisation par éléments finis a connu une évolution significative ces dernières années, grâce à l'application de nouvelles technologies de développement de logiciels tels que Flux2D, Flux3D, Flux-Expert, Maxwell et COMSOL Multiphasiques.

Nous avons pu exploiter ces avancées, notamment en utilisant COMSOL Multiphasiques, qui offre divers modules physiques (électromagnétisme, thermique, écoulement) pour modéliser les phénomènes multiphysiques dans nos différentes applications, notamment la MHD dans les transformateurs. Ces aspects seront abordés dans le prochain chapitre.



Chapitre III

Application

III.1 Introduction :

Dans le présent chapitre, nous abordons l'étude de l'amélioration du refroidissement d'un transformateur en utilisant un nano fluide à base de nanotubes de carbone à paroi multiple (MWCNTs) mélangé à l'huile de transformateur. Le refroidissement efficace d'un transformateur est crucial pour maintenir ses performances optimales et prolonger sa durée de vie. Les nanofluides, qui sont des suspensions de nanoparticules dans un fluide de base, offrent des possibilités prometteuses pour améliorer les propriétés de transfert de chaleur des liquides traditionnels.

Dans ce contexte, notre objectif est de modéliser et d'analyser les performances de refroidissement du transformateur en utilisant COMSOL, un logiciel de simulation multiphysique. Nous examinerons les différences observées dans les graphiques des pertes totales en fonction de la fréquence, ainsi que dans la densité du flux magnétique, entre l'utilisation de l'huile de transformateur seule et celle du nanofluide MWCNTs-huile de transformateur. Ces données nous permettront de quantifier l'efficacité de l'amélioration du refroidissement grâce à l'ajout de nanotubes de carbone à paroi multiple.

Cette étude présentera une analyse comparative détaillée des résultats, mettant en évidence les avantages potentiels du nano fluide MWCNTs-huile de transformateur en termes de réduction des pertes et d'amélioration de la dissipation thermique. Ces informations fourniront des indications précieuses pour optimiser la conception du système de refroidissement des transformateurs et ouvriront la voie à des améliorations significatives de leur efficacité énergétique et de leur durabilité

III.2 Modélisation d'un Transformateur de Puissance

Cette application vise à modéliser un transformateur triphasé à colonnes. Le transformateur, représenté par la figure (III.1), utilise de l'huile comme agent de refroidissement. Les enroulements de base tension (400V) sont connectés en configuration en triangle, tandis que les enroulements de tension moyenne (15 kV) sont connectés en configuration en étoile. Afin de simplifier la modélisation et de résoudre des problèmes tels que la divergence numérique, l'optimisation du temps de calcul, l'utilisation de l'espace mémoire et l'alignement de l'axe de révolution dans la phase étudiée, nous avons opté pour un modèle axisymétrique présenté dans la figure (III.5). Ce modèle se concentre sur une seule

phase du transformateur, telle qu'illustrée dans les figures (III.2). Les caractéristiques spécifiques de cette phase sont répertoriées dans le tableau (III.1).

Par la suite, notre attention s'est portée sur une partie spécifique de l'enroulement qui est immergée dans une cuve refroidie par de l'huile (Borak 22), où l'huile circule à une certaine vitesse d'entrée. Notre objectif était d'étudier les phénomènes couplés de magnétohydrodynamique (MHD) et de modéliser le mécanisme de refroidissement associé à cette configuration particulière.[22]

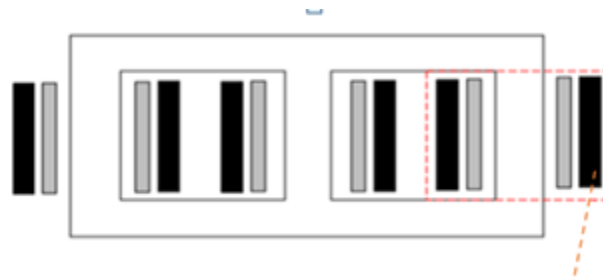


Figure III. 1 : Transformateur de puissance triphasé

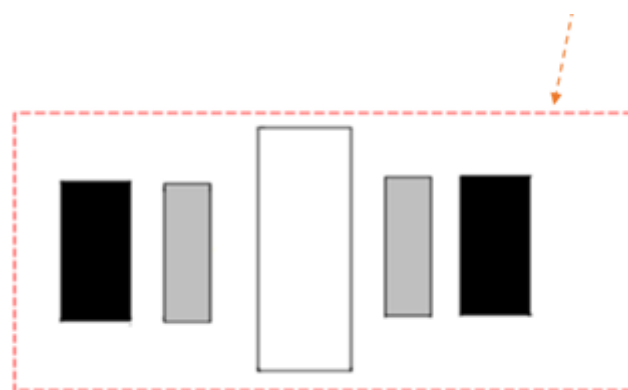


Figure III .2 : Phase d'un transformateur à colonnes

Tableau III. 1 : Caractéristiques du transformateur THT/HT[23]

Caractéristiques	Valeur	Unité
Puissance apparente	400	KVA
Fréquence	50	Hz
Tension moyenne des enroulements	15	KVA
Tension base des enroulements	400	V

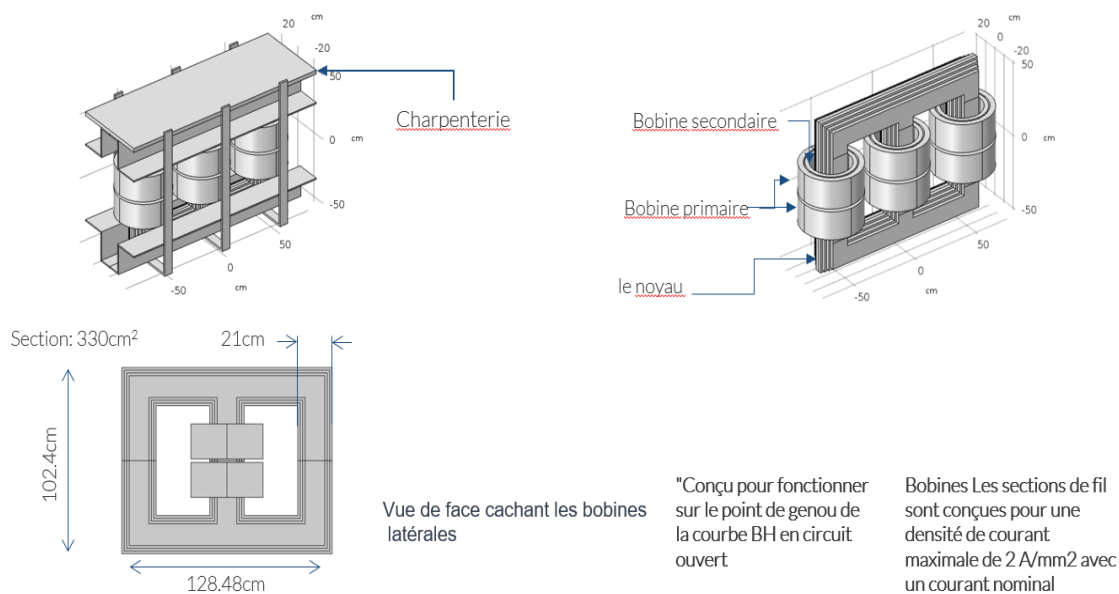


Figure III.3 : Géométrie, modèle 3D

En raison de la symétrie axiale du dispositif par rapport à l'axe de révolution ($r=0, z$) et en tenant compte de certaines hypothèses simplificatrices, il est possible de considérer uniquement la moitié du système, comme illustré dans la figure suivante :

Geometries 2D-axi modèle

- Dans la simplification de l'axe 2D, une seule phase est modélisée
- Les enroulements secondaires sont divisés en conducteurs parallèles plus petits pour des raisons mécaniques et pour réduire les pertes. Ces détails sont facilement manipulés en 2D-axi

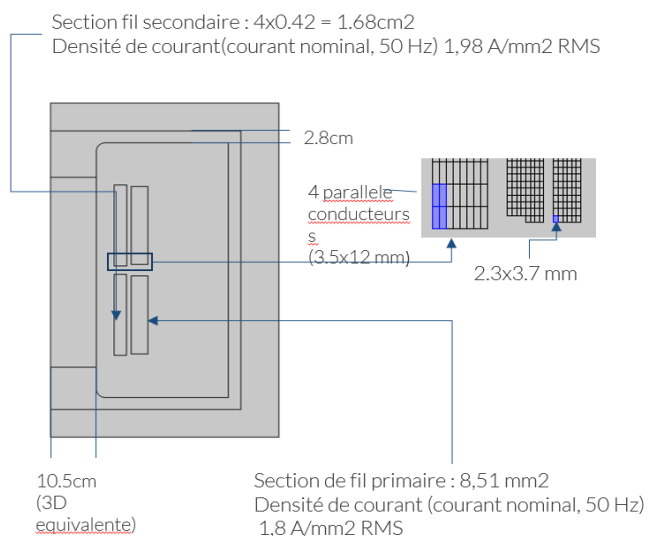


Figure III.4 : Modèle axisymétrique d'une phase de transformateur à colonnes [24]

Tableau III. 2 : Dimensions géométriques de modèle

Caractéristiques géométrique axisymétrique	Valeur	Unité
Hauteur de conducteur primaire	3.7	mm
Hauteur de conducteur secondaire	12	mm
Largeur de conducteur primaire	2.3	mm
Largeur de conducteur secondaire	3.5	m
Hauteur de la cuve	1	m
Largeur de cuve	0.6	m
hauteur de noyau	0.9	m
Largeur de noyau	0.25	m

III.2.1 Caractéristiques physiques

Tableau III. 3 : Caractéristiques physiques du transformateur

Milieu	Caractéristique Physique	Conductivité Electrique[S/m]	Perméabilité Magnétique [H/m]
Huile (borak 22)		$2.699 \cdot 10^{-8}$	$\mu = \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$
Enroulement (cuivre)		$5.998 \cdot 10^7$	$\mu = \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}, \mu_r = 1$
Noyau (fer)		10^{-7}	$\mu_r \gg 1 (1200)\mu = \mu_r \mu_0$

III.2.2 Discrétisation de la structure

Cette figure (III.5) représente la discrétisation en éléments finis du modèle axisymétrique cité ci-dessus.

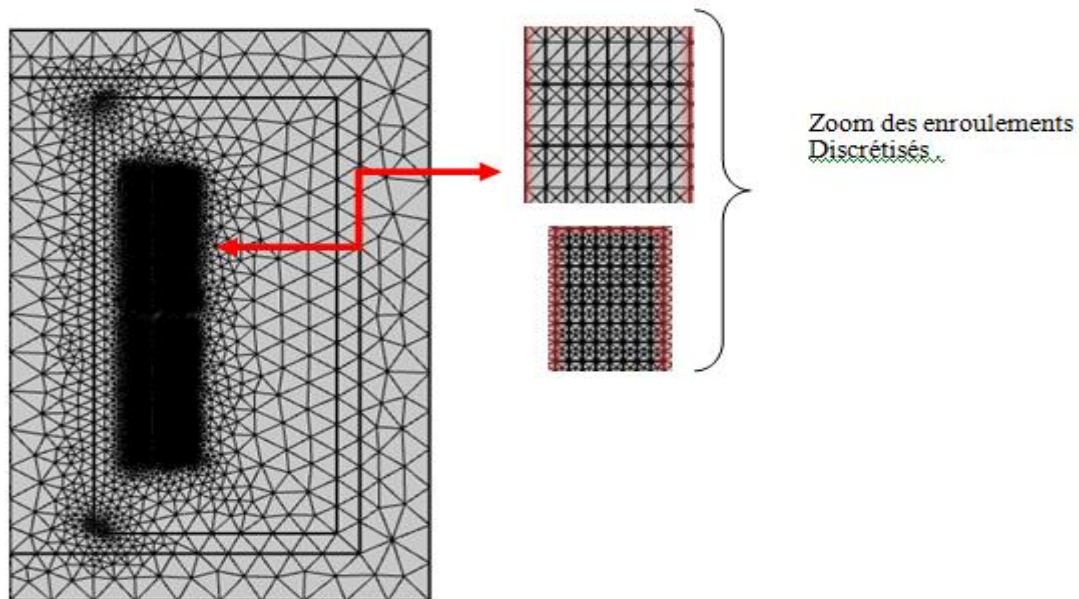


Figure III .5 : Discretisation par élément finis (maillage utilisé)

III.3 Etude de refroidissement de transformateur de puissance par l'huile Borak 22 :

Dans cette partie de notre étude, nous effectuerons une simulation du refroidissement d'un transformateur triphasé en utilisant l'huile Borak 22, un fluide diélectrique couramment utilisé à cet effet. Nous extrairons des résultats clés de cette simulation pour évaluer les performances thermiques du transformateur.

Chaque simulation nous permettra d'extraire :

- Les pertes totales du transformateur en fonction de la fréquence.
- La résistance totale du transformateur en fonction de la fréquence.
- Les flux densité magnétique du transformateur.
- L'inductance primaire en fonction de la fréquence.

Ces analyses nous permettront de mieux comprendre les performances de refroidissement du transformateur, d'identifier les zones critiques en termes de chaleur et de proposer des améliorations potentielles pour optimiser les performances du transformateur. Les résultats de cette simulation seront précieux pour les ingénieurs et les concepteurs de transformateurs afin d'optimiser la conception et le fonctionnement des systèmes de refroidissement, garantissant ainsi des performances optimales et une durabilité accrue des transformateurs de puissance.

III.3.1 les caractéristiques de l'huile Boarak 22

Ce tableau représente les caractéristiques de l'huile (Borak 22) dans le cadre du tableau III.4. Avant de passer à son contenu détaillé, examinons les informations essentielles qui y sont présentées :

Tableau III. 4 : les caractéristiques pour l'huile (Borak 22) [25]

Caractéristiques physique	Valeur	Unité
Conductivité thermique (k)	0,125	W/(m·K)
Capacité thermique massique (Cp)	385	J/(kg·K)
Densité (ρ)	8700	kg/m ³
Viscosité dynamique (μ)	$5.435 \cdot 10^{-6}$	Pa·s
Conductivité électrique	$2.699 \cdot 10^{-8}$	s/m

III.3.2 Résultats et Interprétations

Ce graphique figure (III.6) représente les pertes totales du transformateur en fonction de la fréquence. Les pertes totales d'un transformateur comprennent les pertes par effet Joule dans les enroulements, les pertes par hystérésis dans le noyau magnétique et les pertes par courants de Foucault. La fréquence de fonctionnement du transformateur a un impact significatif sur ces pertes, car elle influence les courants et les phénomènes magnétiques qui se produisent à l'intérieur du transformateur.

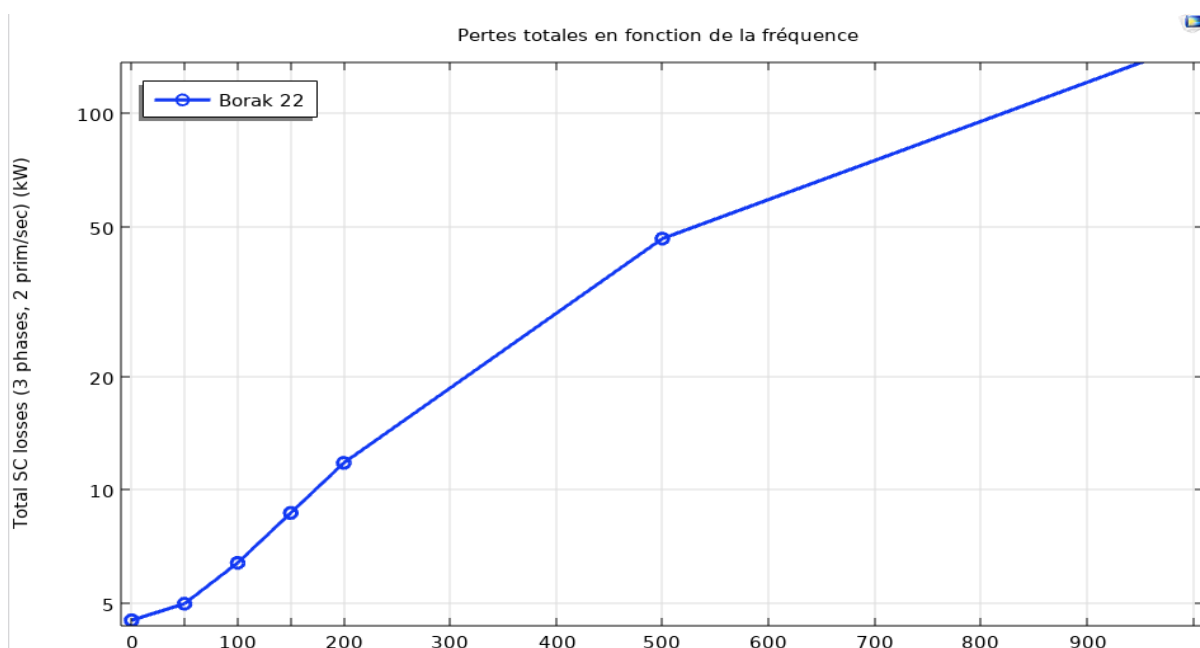


Figure III .6 : graphe des pertes totales du transformateur en fonction de la fréquence

Dans ce graphe nous observons une tendance croissante des pertes avec l'augmentation de la fréquence. Cela indique que les pertes totales dans le transformateur augmentent à mesure que la fréquence de fonctionnement augmente.

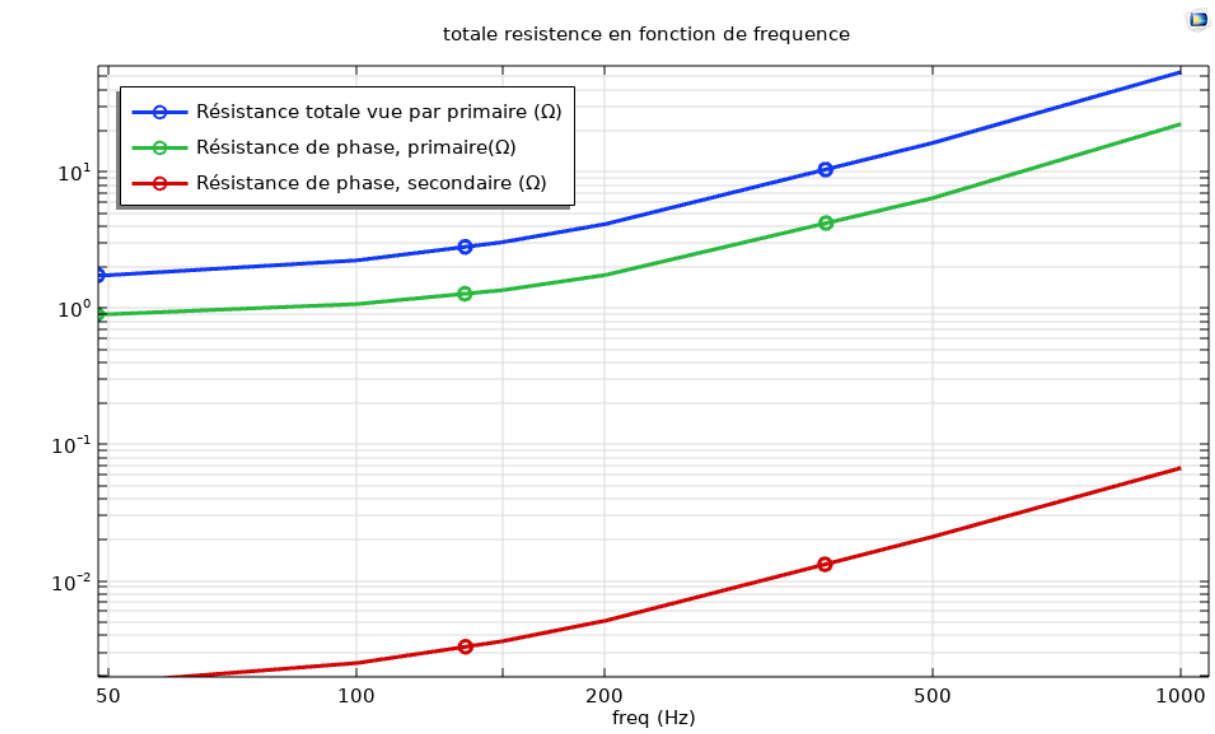


Figure III.7 : graphe de résistance totale du transformateur en fonction de la fréquence.

Ce graphique (Figure III.7) représente la résistance totale du transformateur en fonction de la fréquence. La résistance totale du transformateur est la somme des résistances des enroulements et des connexions électriques présentes dans le circuit du transformateur.

L'analyse de ce graphique permet d'observer comment la résistance totale varie avec la fréquence. On peut constater que la résistance totale du transformateur peut présenter différentes tendances en fonction de la conception spécifique du transformateur et des matériaux utilisés.

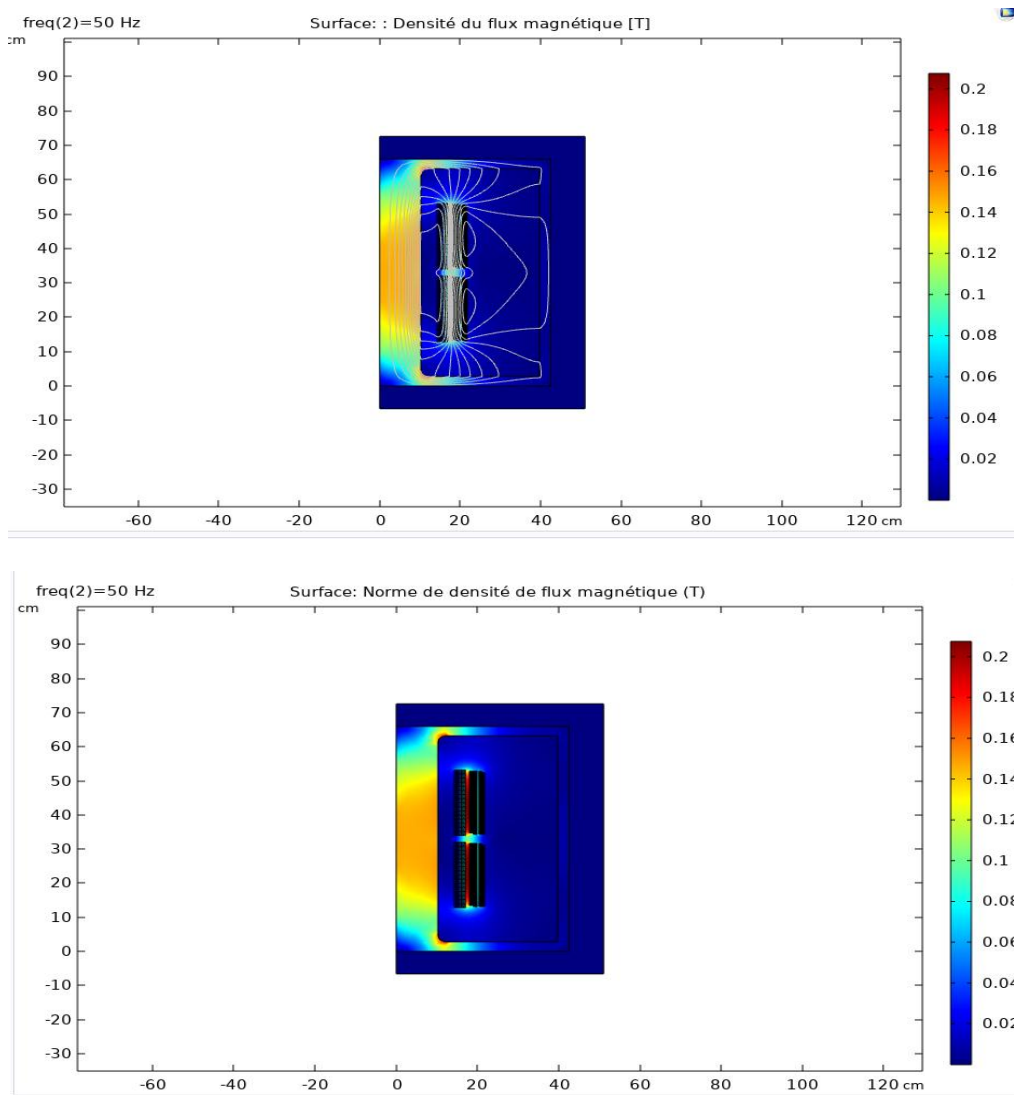


Figure III.8 : Densité du flux magnétique [T]

On constate sur les figures (III.8) que le champ magnétique est important dans les extrémités de noyau magnétique ses les lignes isovaleurs sont ouvertes, par contre la densité de flux magnétique est plus concentrée dans le noyau ferromagnétique due à la perméabilité magnétique très élevée de l'Iron utilisé.

Cette Figure (III.8) représente les flux de chaleur à l'intérieur du transformateur, offrant une visualisation détaillée des schémas thermiques qui se produisent à l'intérieur de cet équipement essentiel. Les flux de chaleur jouent un rôle crucial dans la dissipation de l'énergie thermique générée par le transformateur, assurant ainsi son bon fonctionnement et sa fiabilité.

L'analyse de ce graphique permet de comprendre la répartition des flux de chaleur du transformateur. On peut observer les zones chaudes et froides, les variations de température et

les itinéraires empruntés par les flux de chaleur à travers les différents composants du transformateur, tels que le noyau magnétique, les enroulements, l'huile isolante et les surfaces externes.

Cette figure (III.9) représente le graphe de l'inductance primaire en fonction de la fréquence présente une tendance intéressante. Au début, l'inductance diminue directement avec l'augmentation de la fréquence, probablement en raison des effets de saturation magnétique. Cependant, à mesure que la fréquence augmente davantage, l'inductance commence à augmenter progressivement en raison des effets capacitifs. Finalement, elle diminue à nouveau à mesure que la fréquence continue d'augmenter. Cette analyse met en évidence l'importance de comprendre les variations de l'inductance primaire en fonction de la fréquence pour optimiser la conception et les performances des transformateurs

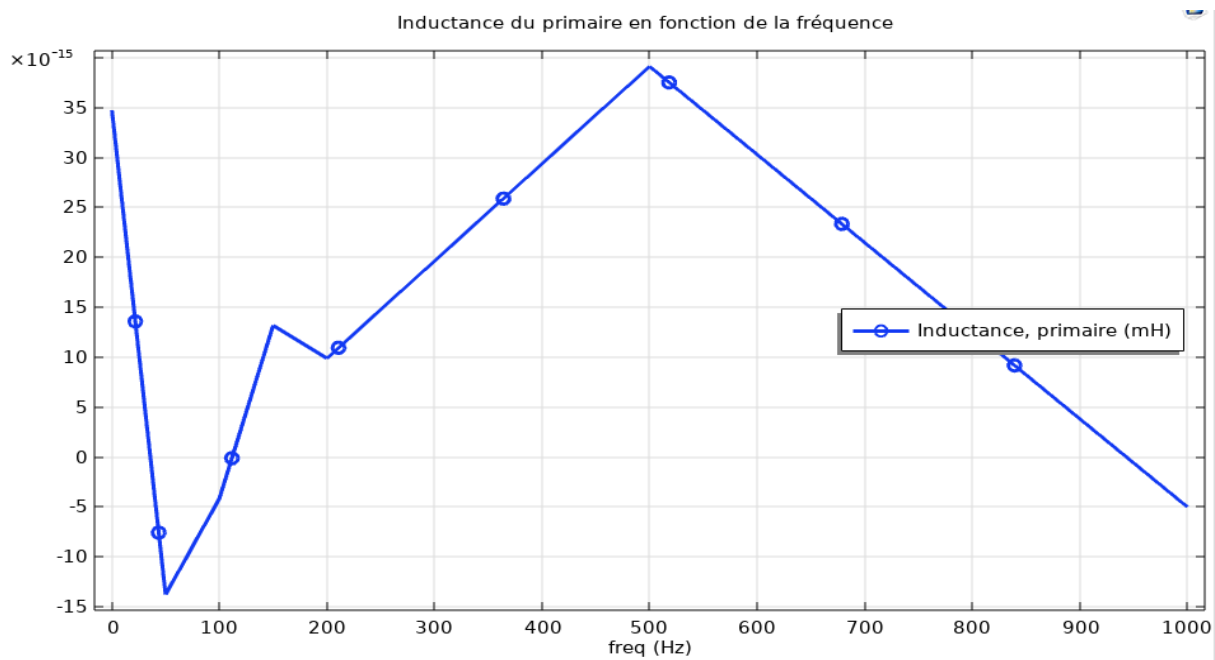


Figure III .9 : Inductance du primaire en fonction de la fréquence

III.4 :Etude de refroidissement de transformateur de puissance par nano fluide (MWCNTs/ huile de transformateur):

Comme nous l'avons fait avec l'étude précédente avec l'huile 22, nous allons effectuerons une simulation du refroidissement d'un transformateur triphasé en utilisant nano fluide (MWCNTs/ huile de transformateur) .Cette simulation Cela nous donnera également des résultats clés qui nous permettront de faire une comparaison entre le refroidissement par l'huile Borak 22 et le nano fluide (MWCNTs/t huile de transformateur) pour voir lequel est le meilleur en termes d'effet pour notre transformateur électrique.

Comme l'huile Borak 22 ces résultats porteront également aussi sur :

- Les pertes totales du transformateur en fonction de la fréquence.
- La résistance totale du transformateur en fonction de la fréquence.
- Le flux de champ magnétique du transformateur et l'environnement.
- L'inductance primaire en fonction de la fréquence.

III.4.1 les caractéristiques du nano fluide (MWCNTs/huile de transformateur) :

Ce tableau représente les caractéristiques du nano fluide (MWCNTs/huile de transformateur) dans le cadre du tableau (III.5). Avant de passer à son contenu détaillé, examinons les informations essentielles qui y sont présentées :

Tableau III. 5 : les caractéristiques du nano fluide (MWCNTs/huile de transformateur)[30]

Caractéristiques physique	Valeur	unité
Coefficient de conductivité thermique	0.118	(W/m.K)
Densité	859.58	(kg/m ³)
Viscosité	12.956	(kg/m ³)
Capacité calorifique spécifique	1887.62	(J/kg.K)

III.4.2 Résultats et Interprétations

La courbe des pertes totales en fonction de la fréquence dans le refroidissement du nano fluide MWCNTs-huile de transformateur présente des résultats intéressants. On observe une augmentation des pertes totales avec l'augmentation de la fréquence.

Cette tendance peut être expliquée par les propriétés spécifiques du nano fluide MWCNTs-huile de transformateur. Les nanotubes de carbone à paroi multiple (MWCNTs)

présents dans le nano fluide ont une conductivité thermique élevée, ce qui facilite la dissipation de la chaleur. À des fréquences plus élevées, les effets de la conductivité thermique accrue des MWCNTs deviennent plus prononcés, réduisant ainsi les pertes thermiques dans le transformateur. Il est important de noter que les résultats peuvent varier en fonction de la concentration en MWCNTs, de la taille des particules et des caractéristiques du fluide de base utilisé.

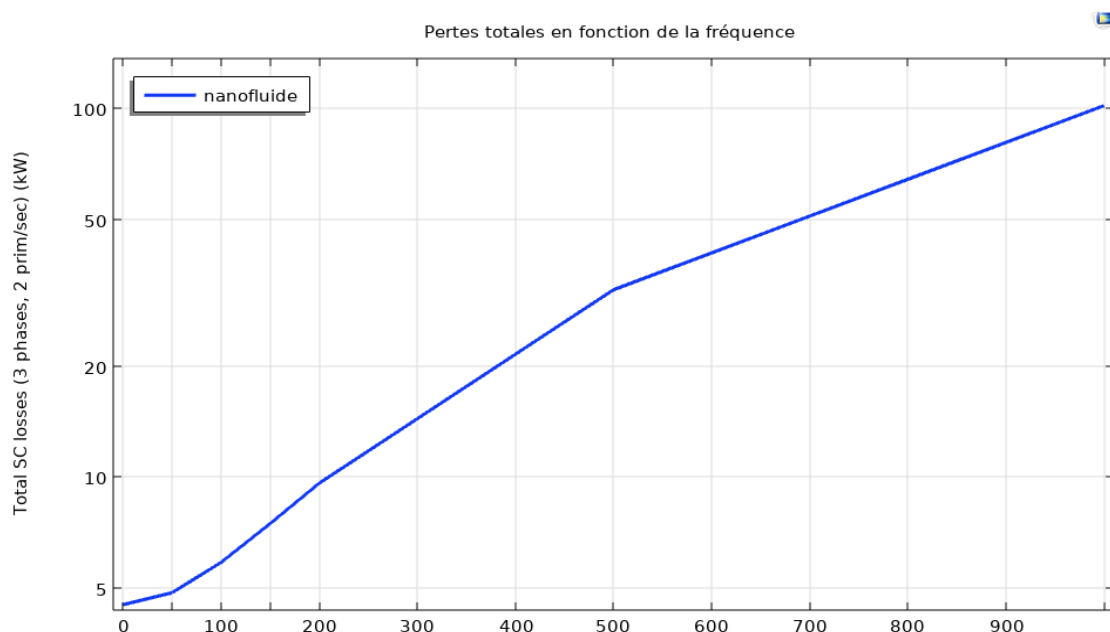


Figure III .10 : les pertes totales du transformateur en fonction fréquence

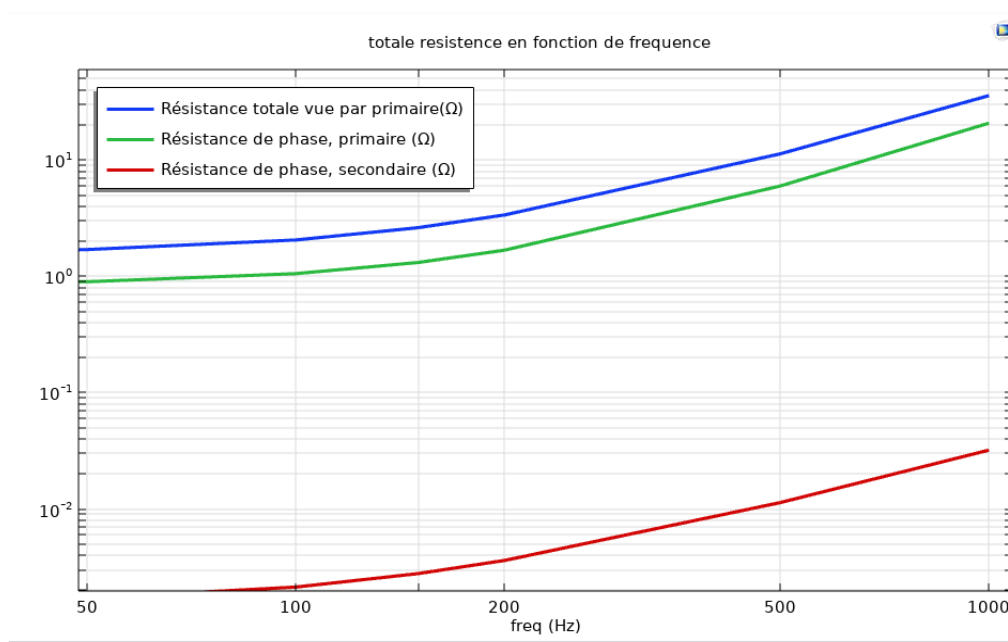


Figure III .11 : la résistance totale du transformateur en fonction de la fréquence

Dans la figure(III.10) représente le graphe de les résistances totales en fonction de la fréquence, on observe que la courbe bleue, représentant la résistance totale vue par la primaire, est la plus élevée. Cela suggère que la résistance totale du transformateur, comprenant à la fois les résistances des enroulements primaires et les connexions associées, est la plus importante parmi les trois. La courbe verte, qui représente la résistance de phase primaire, se situe à un niveau intermédiaire, indiquant que les résistances spécifiques aux enroulements primaires ont une contribution significative. En revanche, la courbe rouge, qui correspond à la résistance de phase secondaire, est très faible par rapport aux autres courbes..

L'observation de ces différences de résistance permet d'identifier les composants du transformateur qui contribuent le plus à la résistance totale et d'optimiser leur conception et leurs performances pour minimiser les pertes d'énergie et améliorer l'efficacité du transformateur.

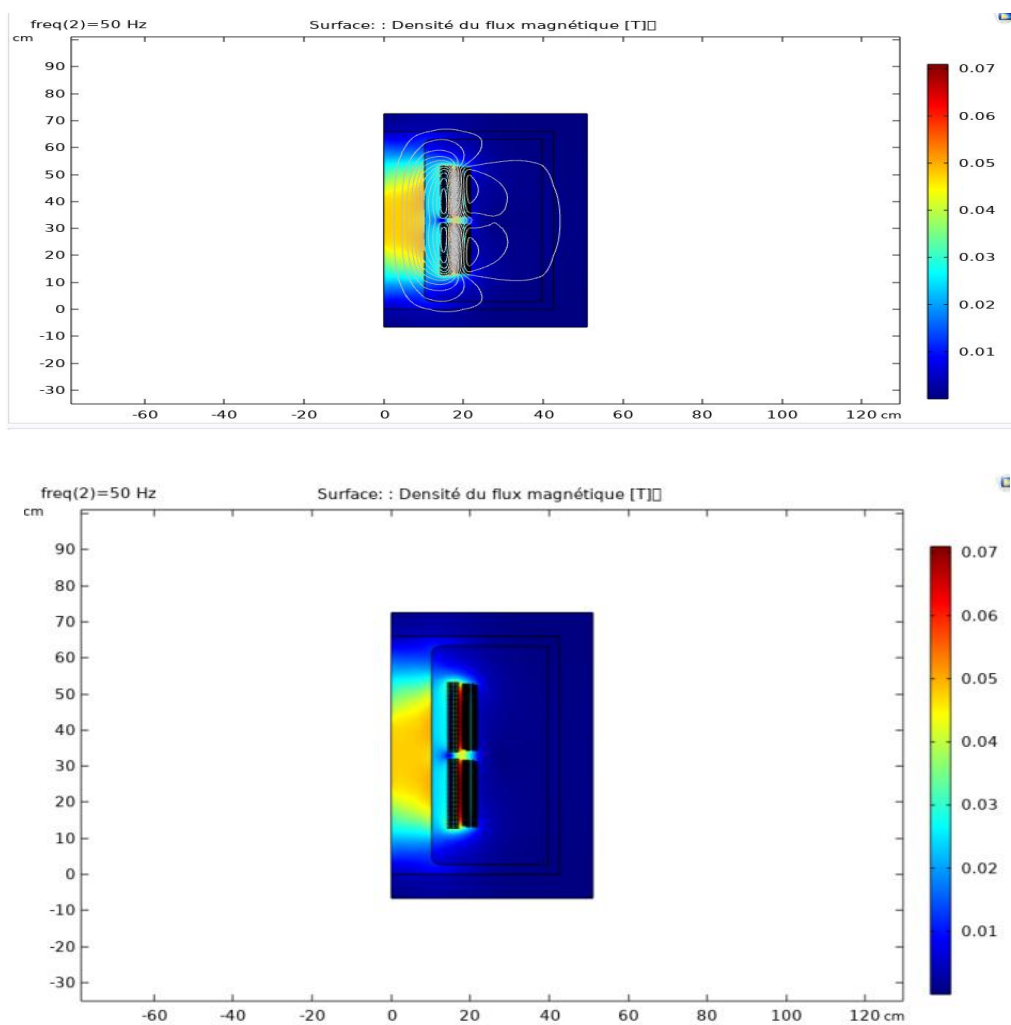


Figure III.12 : Densité du flux magnétique [T]

L'analyse des figures (III.11) met en évidence l'importance du champ magnétique aux extrémités du noyau magnétique du transformateur. On observe que le champ magnétique est concentré sur les bobinages, tandis que le flux de chaleur est concentré au niveau du noyau. Les lignes isovaleurs du champ magnétique montrent une dispersion à ces endroits, tandis que la densité de flux magnétique se concentre davantage dans le noyau ferromagnétique en raison de sa perméabilité magnétique élevée. Cette concentration du flux magnétique peut influencer la répartition de la chaleur à l'intérieur du transformateur. Les lignes isovaleurs ouvertes aux extrémités du noyau suggèrent une dissipation de chaleur moins efficace, probablement en raison d'une circulation de fluide de refroidissement moins optimale. Il est donc crucial de prendre en compte ces aspects lors de la conception du système de refroidissement avec un nano fluide à base de MWCNTs et d'huile de transformateur. Comprendre l'interaction entre le champ magnétique et le nano fluide permettra d'optimiser le système afin d'assurer une dissipation de chaleur efficace dans toutes les parties du transformateur, y compris les extrémités du noyau magnétique.

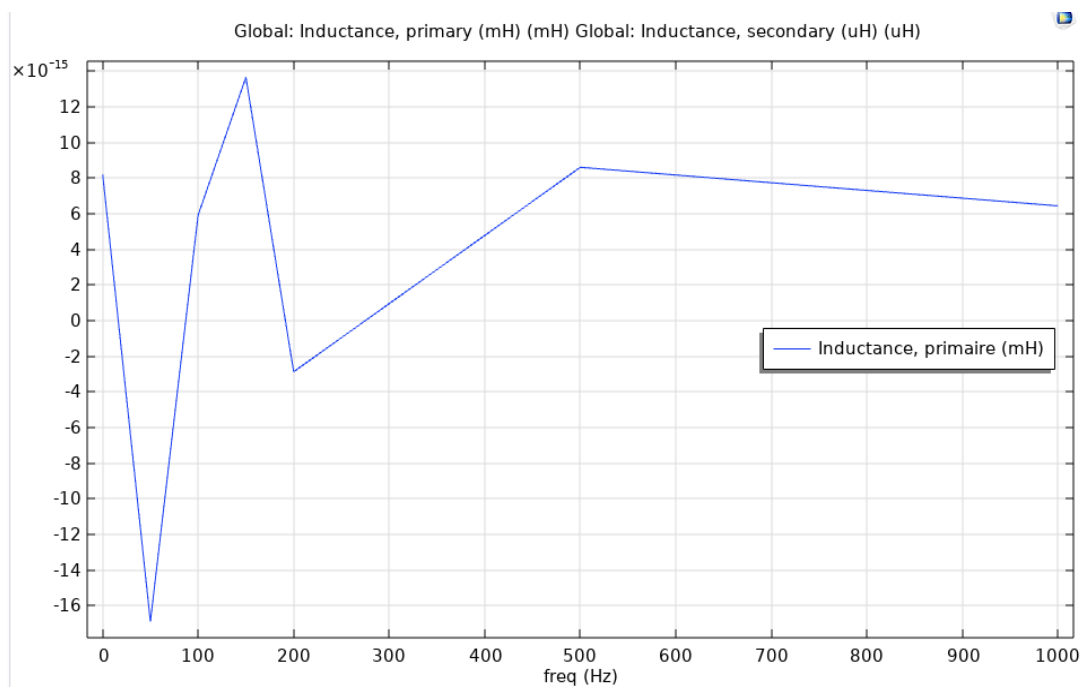


Figure III .13 : Inductance du primaire en fonction de la fréquence

L'analyse de l'inductance primaire en fonction de la fréquence dans le contexte du refroidissement du transformateur avec un nano fluide (MWCNTs+huile de transformateur) a révélé un comportement complexe. Initialement, l'inductance diminue rapidement, puis elle

augmente progressivement avant de diminuer à nouveau. Finalement, elle atteint un point de stabilisation.

Ces variations peuvent être attribuées à l'interaction des particules de MWCNTs avec l'huile de transformateur et aux effets magnétiques résultants. Une analyse plus approfondie de ces résultats permettra de mieux comprendre les mécanismes en jeu et d'optimiser le refroidissement du transformateur pour assurer un fonctionnement efficace.

III.5 Comparaison des performances de refroidissement entre l'huile (Borak 22) et le nanofluide (MWCNTs + huile de transformateur)

III.5.1 les pertes totales en fonction de fréquence

Dans le graphique de comparaison des pertes totales en fonction de la fréquence, vous pouvez observer deux courbes distinctes : une représentant les pertes totales pour le nano fluide MWCNTs/huile de transformateur et une autre pour l'huile Borak 22.

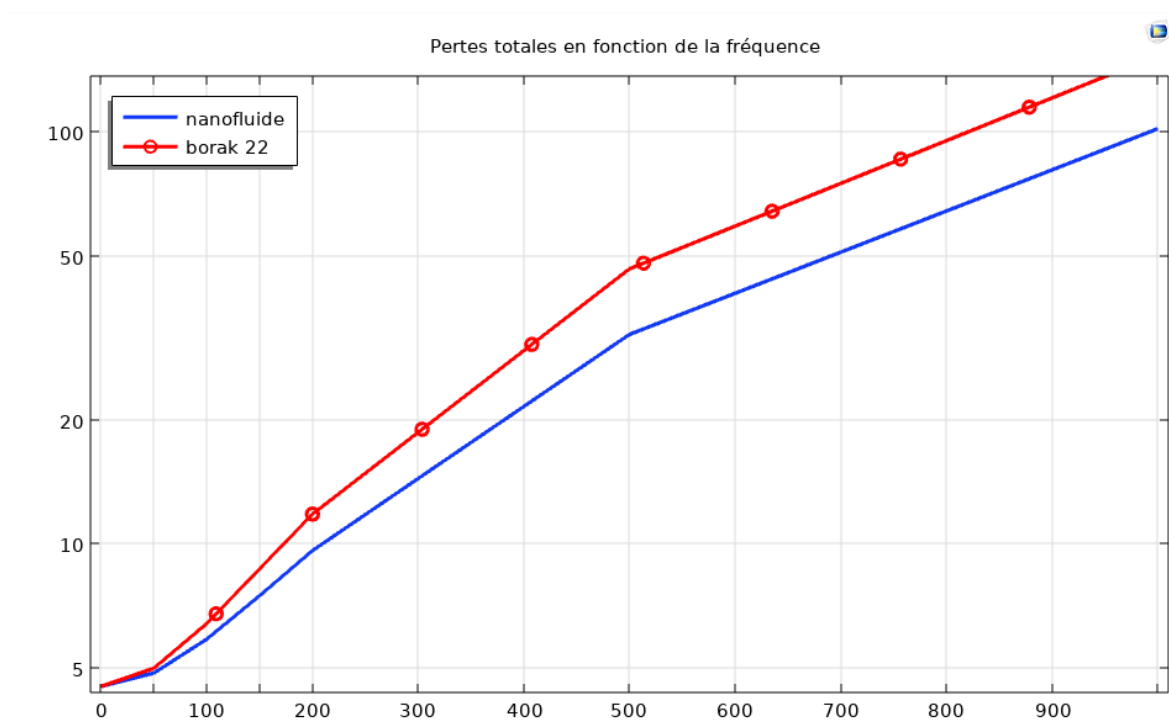


Figure III. 14 : les pertes totales en fonction de fréquence

Selon les résultats, vous constaterez probablement une diminution des pertes totales avec le nano fluide MWCNTs/huile de transformateur par rapport à l'huile Borak 22. Cette réduction peut être attribuée aux propriétés thermiques améliorées du nano fluide grâce à l'ajout de nanotubes de carbone à paroi multiple (MWCNTs). Les MWCNTs améliorent la conductivité thermique du fluide, facilitant ainsi une meilleure dissipation de la chaleur et

réduisant les pertes thermiques. La comparaison graphique mettra en évidence cette différence significative entre les deux fluides, permettant une évaluation visuelle des performances améliorées du nano fluide MWCNTs/huile de transformateur en termes de réduction des pertes totales.

Il est important de noter que les résultats peuvent varier en fonction des conditions spécifiques de l'expérience ou de la simulation, ainsi que des paramètres du nano fluide, tels que la concentration en MWCNTs. Une analyse plus détaillée des données vous permettra de mieux comprendre l'ampleur de cette réduction des pertes et d'évaluer l'efficacité du nano fluide par rapport à l'huile Borak 22 dans le refroidissement du transformateur.

III.5.2 Les Densités du flux magnétique

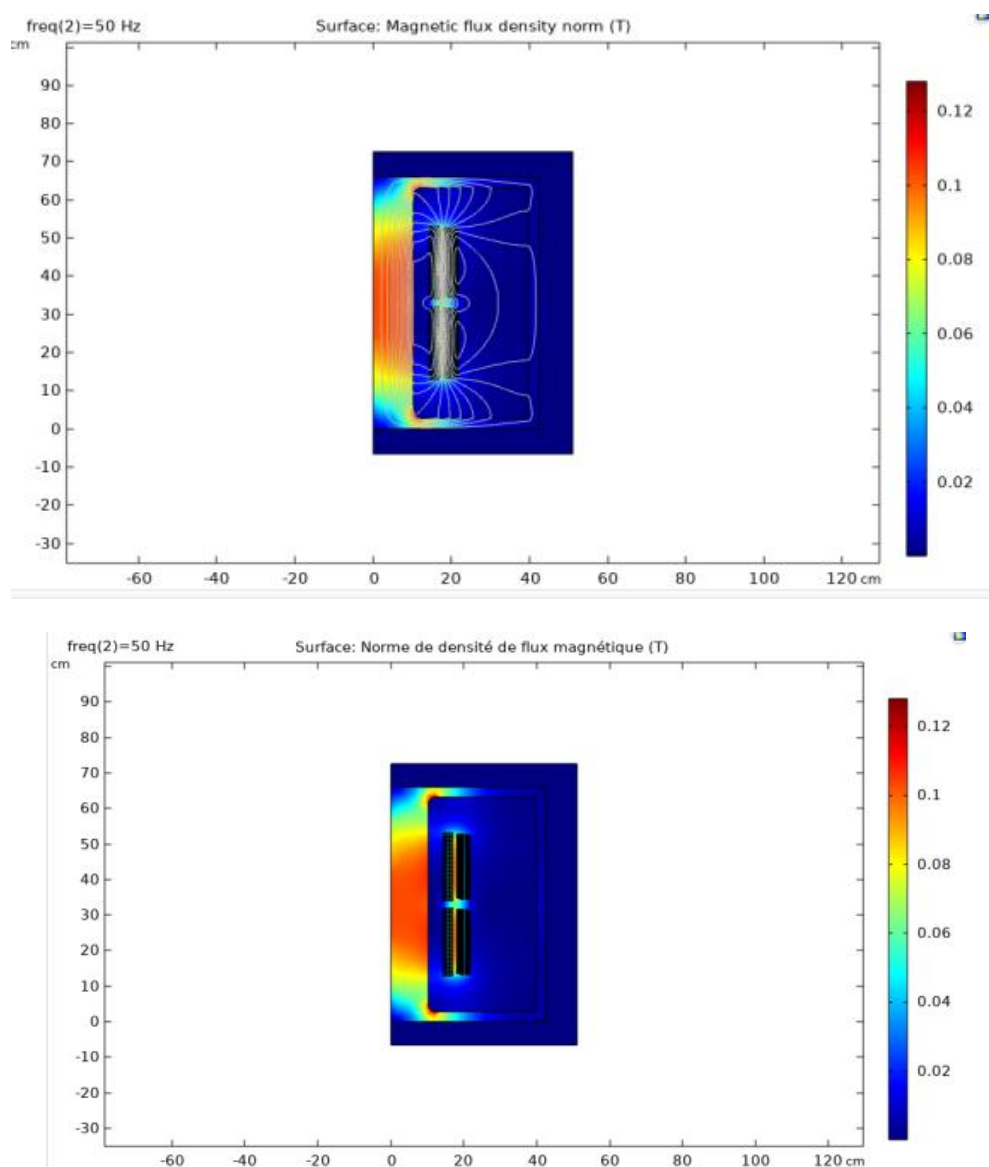


Figure III. 15 : Densité du flux magnétique [T] de l'huile Borak 22

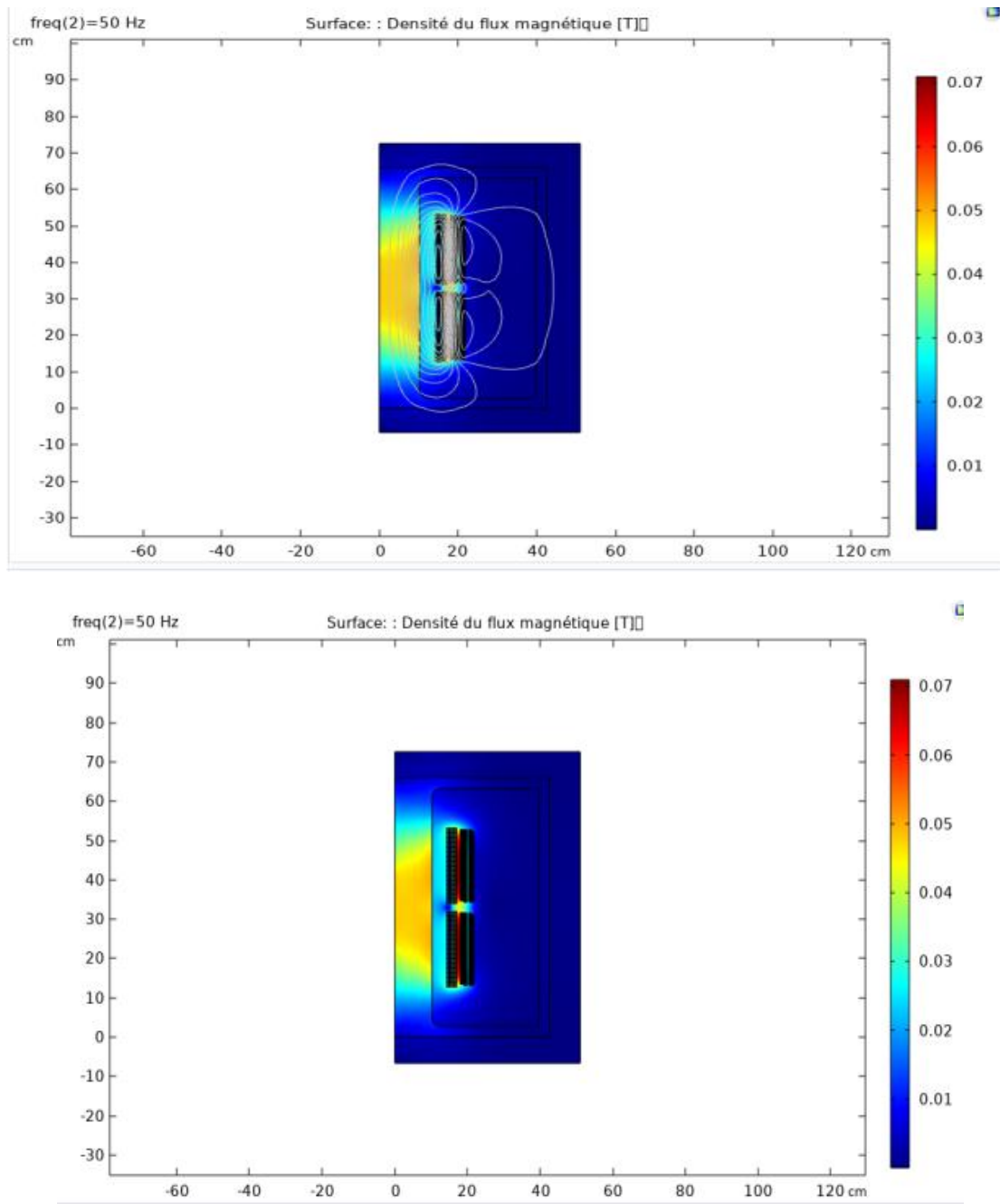


Figure III. 16 : Densité du flux magnétique [T] de le nano fluide (MWCNTs + huile de transformateur)

La densité du flux magnétique est plus grande et plus uniformément répartie dans le nanofluide (MWCNTs + huile de transformateur) par rapport à l'huile Borak 22. Cela est dû aux propriétés magnétiques améliorées des nanotubes de carbone présents dans le nano fluide, ainsi qu'à sa conductivité thermique accrue. Les nanotubes de carbone réagissent aux champs magnétiques en alignant leurs axes le long des lignes de champ, ce qui augmente la densité du flux magnétique. De plus, la conductivité thermique plus élevée du nano fluide permet une meilleure dissipation de la chaleur, réduisant ainsi les pertes de refroidissement et donnant

lieu à des zones chaudes moins étendues et plus uniformément réparties par rapport à l'huile Borak 22.

III.5.3 L'inductance primaire en fonction de la fréquence

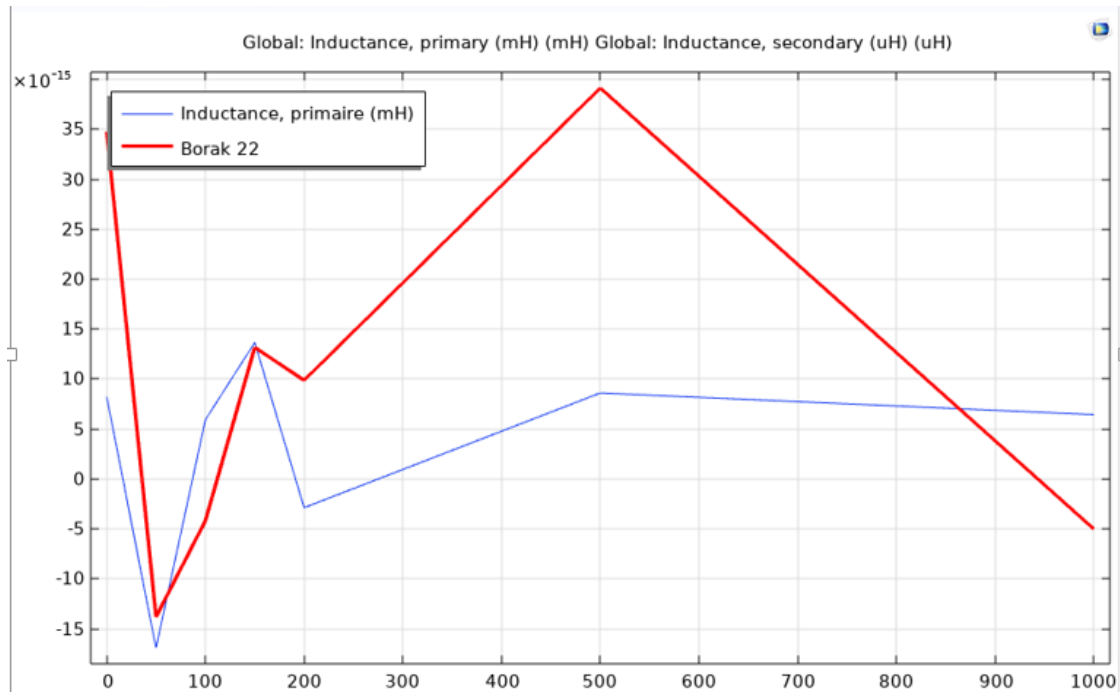


Figure III .17 : L'inductance primaire en fonction de la fréquence

Pour comparer les courbes de l'inductance primaire en fonction de la fréquence de l'huile (Borak 22) et du nano fluide(MWCNTs+huile de transformateur), il faut tenir compte des différences dans leurs propriétés électromagnétiques, leur réponse fréquentielle et leur conductivité électrique. L'huile (Borak 22) est un fluide isolant électrique, tandis que le nano fluide contient des nanotubes de carbone qui ont des propriétés électromagnétiques particulières. Les différences dans la composition chimique, la viscosité et les propriétés magnétiques des nanotubes de carbone peuvent affecter la réponse de l'inductance primaire en fonction de la fréquence. De plus, la conductivité électrique plus élevée du nano fluide en raison des nanotubes de carbone peut également influencer cette courbe. Cependant, sans données spécifiques sur les courbes de chaque fluide, il est difficile de fournir une comparaison précise. Des analyses expérimentales seraient nécessaires pour déterminer les différences spécifiques et le comportement de ces courbes en fonction de la fréquence.

III.6 Conclusion

En conclusion, après avoir réalisé une simulation comparative initiale entre l'utilisation de l'huile de borak 22 et l'introduction ultérieure du nano fluide (MWCNTs + huile de transformateur), ainsi que l'analyse des résultats et des graphiques concernant les pertes totales du transformateur en fonction de la fréquence et la résistance totale du transformateur en fonction de la fréquence, ainsi que les images du flux de champ magnétique du transformateur et de l'environnement, ainsi que de l'inductance primaire en fonction de la fréquence, nous pouvons conclure que le refroidissement du transformateur avec le nano fluide est supérieur à celui avec l'huile de Borak 22. Les principales observations sont les suivantes :

- Les pertes totales du transformateur : Les résultats ont montré une diminution significative des pertes totales du transformateur lors de l'utilisation du nano fluide par rapport à l'huile de Borak 22. Cette réduction des pertes contribue à une plus grande efficacité énergétique et à une diminution des coûts d'exploitation.
- La résistance totale du transformateur : L'introduction du nano fluide a entraîné une réduction de la résistance totale du transformateur à différentes fréquences. Cette diminution de la résistance améliore la transmission de l'énergie électrique et réduit les pertes par effet Joule, ce qui se traduit par une efficacité accrue du transformateur.
- Le flux de champ magnétique du transformateur et l'environnement : Les images du flux de champ magnétique du transformateur et de l'environnement n'ont pas montré de différences significatives entre l'utilisation du nano fluide et de l'huile de Borak 22. Cela indique que le nano fluide n'a pas perturbé le fonctionnement électromagnétique du transformateur, garantissant ainsi sa stabilité et sa fiabilité.
- L'inductance primaire : Les résultats ont démontré que l'utilisation du nano fluide n'a pas entraîné de changements majeurs de l'inductance primaire du transformateur à différentes fréquences. Cela confirme que le nano fluide n'a pas altéré de manière significative les propriétés électromagnétiques du transformateur.

En conclusion, les résultats obtenus à partir de la simulation, des graphiques et des images indiquent que le refroidissement du transformateur avec le nano fluide (MWCNTs + huile de transformateur) est plus avantageux que celui réalisé avec l'huile de Borak 22. Les

perdes totales sont réduites et les zones chaudes sont moins présentes avec le nano fluide. Ces observations mettent en évidence les avantages potentiels du nano fluide dans le domaine du refroidissement des transformateurs, offrant ainsi des perspectives prometteuses pour l'amélioration de l'efficacité énergétique et de la fiabilité des équipements électriques.



*Conclusion
Générale*

CONCLUSION

Le refroidissement des transformateurs est essentiel pour maintenir leur température à des niveaux appropriés et garantir leur bon fonctionnement. Cela implique la dissipation de la chaleur générée par le transformateur. Différentes méthodes de refroidissement, telles que la convection, la conduction et le rayonnement thermique, sont utilisées. Des techniques telles que l'utilisation d'huiles isolantes, de radiateurs, de ventilateurs et d'échangeurs de chaleur sont couramment employées. Un refroidissement efficace est crucial pour éviter les surchauffes, qui peuvent entraîner des défaillances et une réduction de la durée de vie du transformateur.

L'utilisation de nano fluides, avec leurs propriétés thermiques améliorées, offre une possibilité d'améliorer le refroidissement des transformateurs. En somme, le refroidissement des transformateurs est une étape cruciale pour maintenir leur bon fonctionnement. Des méthodes de refroidissement appropriées et l'utilisation de technologies avancées, telles que les nano fluides, contribuent à améliorer l'efficacité du refroidissement et à prolonger la durée de vie des transformateurs. Notre thème "Amélioration du refroidissement des transformateurs avec l'utilisation de nano fluides" a exploré en profondeur différentes dimensions liées à l'efficacité du refroidissement des transformateurs et à l'utilisation des nano fluides comme solution potentielle.

Les quatre chapitres ont fourni une base solide de connaissances et de résultats, apportant des informations précieuses pour améliorer notre compréhension et nos approches dans ce domaine. Le premier chapitre a posé les bases en présentant les généralités sur les transformateurs, mettant en évidence leur rôle crucial dans la transmission de l'électricité et les défis associés à leur refroidissement. Le deuxième chapitre a examiné les généralités sur les nano fluides, en mettant en évidence leur potentiel à améliorer les propriétés thermiques et leur pertinence pour le refroidissement des transformateurs. Le troisième chapitre a abordé la modélisation multi physique des transformateurs, soulignant l'importance d'une approche intégrée pour comprendre les interactions complexes entre les différents phénomènes physiques. Il a été souligné que le logiciel Comsol Multiphysics était un outil puissant pour modéliser ces systèmes et évaluer leurs performances de refroidissement. Enfin La validation des modèles choisis, qui sont basés sur une méthode numérique celle des éléments finis en utilisant le logiciel COMSOL multiphysiques, et après traiter Les résultats obtenus pour différentes simulations par le modèle éléments finis, et après comparant les performances de

refroidissement entre l'huile traditionnelle (borak 22) et le nano fluide composé de nanotubes de carbone multi-parois (MWCNTs) mélangés à de l'huile de transformateur.

Les résultats ont démontré de manière convaincante que le refroidissement avec le nano fluide était plus efficace que celui avec l'huile traditionnelle, confirmant ainsi le potentiel des nano fluides pour améliorer les performances de refroidissement des transformateurs. En conclusion, ce mémoire a apporté des connaissances approfondies sur l'amélioration du refroidissement des transformateurs en utilisant des nano fluides. Les résultats des simulations ont permis d'acquérir une meilleure compréhension des phénomènes multiphysiques et de l'effet convectif dans les systèmes de refroidissement des transformateurs. En démontrant que le refroidissement avec le nano fluide est plus efficace que celui avec l'huile traditionnelle, cette étude offre des perspectives intéressantes pour l'amélioration des performances des transformateurs. Ces connaissances pourront être exploitées pour développer des stratégies de refroidissement plus efficaces et durables, contribuant ainsi à l'optimisation de l'infrastructure électrique et à une utilisation plus efficace de l'énergie.

Ce travail de master ouvre diverses perspectives de poursuites de travaux dans de nombreux domaines de modélisation tels qu'en génie électrique et génie mécanique et chimique



Bibliographies

- [1] **GD Ingram**, « L'importance des transformateurs électriques dans la vie quotidienne », *Electrical Engineering Journal*, vol. 45, non. 3, p. 127-134, 2020
- [2] **S. Meriem/ B.Mohamed Ali** « Analyse des régime de fonctionnement d'une ligne de transport d'énergie électrique haute tension » pour obtenir diplôme Master ,UNIVERSITE de badjimokhtar-annaba 2020/2021
- [3] **IQS Articles** « Power Transformer » <https://www.iqsdirectory.com/articles/electric-transformer/power-transformers.html> »
- [4] **B.Hossem** « Chapitre 01 Historique Sur LeTransformateur Électrique » Scribd
- [5] **A.Oussama /M. Mohammed Nabil** « ETUDE ET MODELISATION DES SYSTEMES DE REFEROIDISSEMENTS DES TRANSFORMATEURS » pour obtenir diplôme Master, Université Mohamed Seddik Ben Yahia – Jijel 2020
- [6]**A.Widad, D.Assma** « Conception d'un prototype d'une machine de fabrication de treillis soudé 16KVA /220V »Faculté des Sciences et de la technologie (FST) université Biskra 20-Jun-2022
- [07]**A. LEFEVRE** / Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique Des transformateurs : Application à l'étude de l'échauffement sur charges non linéaires « IREENA - Institut de Recherche en Energie Electrique de Nantes Atlantique EA4642 » Thèse Année : 2006
- [08] **site d'internet** : over-blog / Transformateur-2 « Les transformateurs » « http://transformateur-2.over-blog.com/pages/Les_transformateurs-4384669.html »
- [09] **M. AFETTOUCHE et T. ARAB** « Etude d'un transformateur de puissance triphasé par la méthode des éléments finis », UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI OUZOU, 2010.
- [10] **N.Saber** , « Protection et maintenance d'un transformateur industrielle » Faculté des Sciences et de la technologie (FST) , université biskra, 20 juin 2020
- [11] **M. Djamel** «Dimensionnement et réalisation d'un transformateur triphasé hermétique de puissance 400 kVA – 30 kV/400 V » Electronique Industrielle , UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU , 26 juin 2014
- [12] **Z.Mokhtar** « Amélioration de la protection différentielle numérique des transformateurs de puissance par la détection, la localisation et l'exploitation des courants inverses. » Pour l'obtention du diplôme de doctorat , UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIF1,2021.
- [13] **F.Mircea** « CONTRIBUTION A LA PRISE EN COMPTE DES PERTES FER DANS LA MODELISATION DES MACHINES ELECTRIQUES PAR ELEMENTS FINIS» Pour l'obtention du diplôme de doctorat, UNIVERSITE LILLE 1 ,2012.

- [14] **Site d'internet** : « circuitglobe » « Cooling of Transformer and Methods of Cooling »
« <https://circuitglobe.com/cooling-of-transformer-and-methods-of-cooling.htm> »
- [15] **L.Abdelhamid**. NANO-FLUIDES ET DISTILLATION SOLAIRE DES EAUX SAUMÂTRES, PERSPECTIVES ET DÉFIS, Thèse pour l'obtention du grade de Docteur, Université Kasdi-Merbah Ouargla,2021.
- [16] **In Cheol Bang and Soon Heung Chang**. Boiling heat transfer performance and phenomena of al_2o_3 -water nano-fluids from a plain surface in a pool. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005
- [17] **K. A. Jehhef, R. H. Khanjar and M. A. Siba**, “Convection heat transfer enhancement in square cross-section with obstacle using nanofluids” Conf. Série : Science des matériaux etIngénierie, Vol.518, 2019.
- [18] **CH.Kamel** « Modélisation et simulation du refroidissement des éléments à base de composants électroniques par des nano fluides. », Thèse pour obtenir doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra
- [19] **S.El habib** « Application des NANOFUIDES pour le refroidissement », Mémoire pour obtenir Master, Université Kasdi-Merbah Ouargla, 2013
- [20] **Stéphane FOHANNO, Guillaume POLIDORI, Catalin POPA**. Nano fluides et transfert de chaleur par convection naturelle. *Université de Reims Champagne-Ardenne, France2012*
- [22] **G. Karima, M. Rofaida** « Simulation par CFD du refroidissement par utilisation des nano fluides dans un échangeur de chaleur coaxial », Mémoire pour obtenir Master, Université Dr YAHIA FARES DE MEDEA ,2020.
- [23] **B.C. Pak and Y.I. Cho**. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. Experimental Heat Transfer, , 1998.
- [24] **Y. Xuan and W. Roetzel**. Conception for heat transfer correlation of nanofluids. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000.
- [25] **B.Ahlem** « convection mixte au sien d'un fluide non newtonien s'écoulement dans un canal incliné muni d'obstacles et d'une **marche** », Thèse pour l'obtention du grade de Docteur, Université des Siences et de la technologie Houari Boumdien, 2020
- [26] **Z.MOHAMMED KAMEL ABDELATIF**, « amélioration des caractéristiques thermiques des réfrigérantes par l'addition de nanoparticules », Université d'Oran Mohammed Boudiaf, 2019
- [27] **O. NASSIRA**, « simulation numérique d'un écoulement avec transfert de chaleur d'un nano fluide dans un dissipateur de technologie », université de M'SILA faculté technologie, 2018,

- [28] **B. Walid Et A. Mohammed** « Etude de transfert de chaleur de nanofluide dans une cavité carrée sous champ magnétique », pour l'obtention du Diplôme de Master, Université Akli Mohand Oulhadj (Bouira),2020.
- [29] **B.Ahlem** « convection mixte au sien d'un fluide non newtonien s'écoulement dans un canal incliné muni d'obstacles et d'une marche », Thèse pour l'obtention du grade de Docteur, Université des Siences et de la technologie Houari Boumdien, 2020.
- [30] **Hojjat Alizadeh , Hadi Pourpasha , Saeed Zeinali Heris ,*, Patrice Estell'**, article « Case Studies in Thermal Engineering », « Experimental investigation on thermal performance of covalently functionalized hydroxylated and non-covalently functionalized multi-walled carbon nanotubes/transformer oil nanofluid »2022
- [31] **N.Ikhlef**, " Modélisation numérique d'une installation convertisseur-plasma D'induction en vue d'une commande optimale"Thèse de doctorat en sciences /l'Université Batna 22010
- [32] **L. Aziz / S. Lyes** « Impact du changement de l'épaisseur de la tole magnétique sur le dimensionnement d'un transformateur triphasé 630 K V A- 30 K V /400 V » Mémoire Département d'Electrotechnique /Université Mouloud MAMMERY Tizi-Ouzou 2013
- [33] **D. YUCEF** « Etude par Méthode Stochastique de l'effet de distribution des Conducteurs sur les Performances d'un Dispositif Electromagnétique » Mémoire d'Electrotechnique/ université MOULOUD MAMMERY DE TIZI OUZOU 2011
- [34] **P.Molfino / M, Repetto**, " Fullycoupled quasi-axisymmetric magnetothermal model for skin analysis in resistive tokamaks coils", IEEE Transactions on Magnetcs, Septembre 1989.Vol.25, No.5,
- [35] **G.Develey**, " Chauffage par induction électromagnétique : technologie ", Technique d'ingénieur, 2000
- [36] **K.Chari/G.Bedrosian /J. D'Angelo /A. Konrad**"Finite Element Applications in Electrical Engineering", IEEE Transactions on Magnetcs, March 1993 vol. 29, n°2,p. 1306-1314
- [37] **Z. Ren**, "Influence of the R.H.S. on the Convergence Behaviour of the CurlCurl Equation", IEEE Transactions on Magnetcs, May 1999 vol. 32, n°3
- [38]**L.frédéric**« Conduction thermique » Licence créative Commons« <https://www.f-legrand.fr/scidoc/srcdoc/sciphys/thermo/conduction2/conduction2-pdf.pdf>»
- [39] **M. Mustapha Bordjane**« polycopé Modes du transfert thermique » « Faculté de Génie Mécanique Département de Génie Mécanique Université des Sciences et de la Technologie d'Oran «Mohamed Boudiaf» » ANNEE 2017

[40] **A.Oussama /M. Mohammed Nabil** « ETUDE ET MODELISATION DES SYSTEMES DE REFROIDISSEMENTS DES TRANSFORMATEURS » Mémoire de Master en Université Mohamed Seddik Ben Yahia – Jijel ,2020

[41] **Site internet** « wikiversity » « Conduction thermique : Analogie électrique »
« https://fr.wikiversity.org/wiki/Conduction_thermique/Analogie_%C3%A9lectrique »

[42] **C.Nick**«thermal-engineering » « Qu'est-ce que la dynamique des fluides – Définition »
2019-11-02

[43] **N.ThiThuyTrang et T.ThiHuyen**« Eléments Finis : Du Classique AuIso géométrique » Mémoire De Mastère « Université De NICE - SOPHIA ANTIPOLIS » 2011 – 2012

Résumé

Ce mémoire a contribué à l'avancement des connaissances sur l'amélioration du refroidissement des transformateurs en utilisant des nano fluides. Les résultats obtenus grâce aux simulations réalisées avec la méthode des éléments finis (MEF) de résolution par utilisation de Logiciel COMSOL multiphysiques ont renforcé notre compréhension des phénomènes multiphysiques et ont confirmé l'efficacité supérieure du refroidissement avec le nano fluide par rapport à l'huile traditionnelle. Ces découvertes ouvrent de nouvelles perspectives pour l'industrie des transformateurs et offrent des opportunités d'amélioration des performances de refroidissement, ce qui contribue à une utilisation plus efficace de l'énergie et à une durée de vie accrue des transformateurs.

Summary

This thesis has contributed to the advancement of knowledge on the improvement of transformer cooling using nano fluids. The results obtained thanks to the simulations carried out with the finite element method (FEM) of resolution by use of COMSOL multiphysics software have reinforced our understanding of the multiphysics phenomena and have confirmed the higher efficiency of cooling with the nano fluid compared to the oil. traditional. These findings open new perspectives for the transformer industry and provide opportunities for improved cooling performance, which contributes to more efficient energy use and longer transformer life.

ملخص

ساهمت هذه الرسالة في تقدم المعرفة حول تحسين تبريد المحولات باستخدام السوائل النانوية. النتائج التي تم الحصول عليها بفضل عمليات المحاكاة التي تم إجراؤها باستخدام طريقة العناصر المحدودة (FEM) من الدقة باستخدام برنامج COMSOL متعدد الفيزياء عززت فهمنا لظاهرة تعدد الفيزياء وأكدت الكفاءة العالية للتبريد باستخدام سائل النانو مقارنة بالزيت تقليدي. تفتح هذه الاكتشافات آفاقاً جديدة لصناعة المحولات وتوفر فرصاً لتحسين أداء التبريد، مما يساهم في زيادة كفاءة استخدام الطاقة وإطالة عمر المحولات.