

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITÉ ABDERRAHMANE.MIRA BEJAIA**

**FACULTÉ DE TECHNOLOGIE**

**DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER

FILIÈRE : MACHINE ELECTRIQUE

**Thème :**

---

**Simulation numérique du comportement  
thermique d'un transformateur triphasé**

---

**Réalisé Par :**

KHELLAL Takfarines

TALANTIKIT ABDELHADI.

**Encadré par :**

M<sup>r</sup>. ALITOUCHE Karim

Année Universitaire 2021-2022

# Remerciement

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

Nous adressons nos sincères remerciements à notre encadrant Mr ALITOUCHE. K enseignant à l'université de Bejaïa A/Mira. D'avoir bien voulu nous encadrer et pour son aide et les conseils qu'il n'a cessé de nous prodiguer pour l'aboutissement de ce travail, qu'il trouve ici notre profonde gratitude et toute notre reconnaissance.

Que tous les membres de jury trouvent ici notre plus profonde reconnaissance pour avoir accepté de juger ce travail.

Nos remerciements s'adressent également aux enseignants qui ont contribué à notre formation, et à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à l'achèvement de ce travail.

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

## Dédicaces

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail,

A ma très chère mère, qui me donne toujours l'espoir de vivre et qui n'a jamais cessé de prier pour moi.

A mon très cher père, pour mes encouragements, son soutien, surtout pour son amour et son sacrifice afin que rien n'entrave le déroulement de mes études.

A mes frères et mes sœurs

A ma très chère Vanessa

A mon très cher binôme et frère TALANTIKIT ABDELHADI

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

A tous ceux que j'aime.

KHELLAL TAKFARINES.

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A ma maman et mon père qui m'ont soutenu et encouragé durant ces années d'études.

Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

A mon grand frère et ma petite sœur, mes grands-parents et ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

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

A mon très cher binôme et frère, KHELLAL TAKFARINES.

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

A tous ceux que j'aime.

TALANTIKIT ABDELHADI.

## Liste des figures

### Chapitre I : Généralités sur les transformateurs

Figure-I-1-Circuit magnétique d'un transformateur

Figure-I-2- Transformateur cuirassé.

Figure-I-3- Transformateur à colonnes.

Figure-I-4-Bobines primaire et secondaire d'un transformateur.

Figure-5-Représentation de la partie constructive.

Figure-I-6-Transformateur monophasé.

Figure-I-7-Transformateur de puissance.

Figure-I-8-Transformateurs de courant.

Figure-I-9-Transformateurs de tension.

Figure-I-10-Symbole de transformateur monophasé.

Figure-I-11- Symbole du transformateur triphasé.

Figure-I-12- Transformateur triphasé.

Figure-I-13- Indice horaire.

Figure-I-14- Les modes de refroidissement de transformateur.

Figure I-15 : Conduction ou diffusion thermique dans un solide sous une différence de température.

Figure-I-16- : Représentation schématique du transfert thermique par radiation

### Chapitre II Transfert thermique

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

Figure.II.2 : Représentation schématique du transfert thermique par radiation.

Figure.II.3. Isotherme et gradient thermique

Figure II.4. Bilan thermique sur un système élémentaire

Figure.II.5. Evolution de la température d'un milieu à température uniforme

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

Figure III-1- Configuration géométrique transversal 2D de la moitié du transformateur.

Figure-III-2 : Conditions aux limites sur le transformateur.

Figure-III-3- Organigramme de calcul utilisant la méthode des éléments finis

Figure-III-4-Maillage en éléments finis du système 2D du transformateur.

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

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

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

Figure-III-8- Répartition de température dans le transformateur  $d=0.009$  m

Figure-III-9- Répartition de température dans le transformateur  $d=0.007$  m

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

Figure-III-11- Courbe de la variation de température dans différentes zones du transformateur le long de la ligne rouge des figures (-III-8-) et (-III-9-) et (-III-10-).

Figure III-12- Répartition de température dans le transformateur  $d=0.009$ m avec des pertes variables

Figure III-13- Répartition de température dans le transformateur  $d=0.007$ m avec des pertes variables

Figure III-14- Répartition de température dans le transformateur  $d=0.005$ m avec des pertes variables

Figure-III-15- Courbes de la variation de la température le long de la ligne soulignée en rouge sur les figure (-III-12-) et (-III-13-) et (-III-14-)

Figure-III-16- Organigramme de calcul pour le régime évolutionnaire

Figure III-17- L'évolution de la température en fonction du temps

Figure III-18- Evolution de la température en fonction du temps avec des pertes Joule variables.

Figure -III-19- Densité des pertes Joule volumiques en fonction du temps

Figure III-20- Résistance  $R_{HT}$  en fonction du temps

Figure III-21- Résistance  $R_{BT} (\Omega)$  en fonction du temps

Figure III-22- Courbes comparatives des températures dans les différentes régions du transformateur avec et sans prise en compte des variations des résistances en fonction de la température

## Liste des tableaux

### Chapitre I : Généralités sur les transformateurs

Tableau-I-1-Ordres de propriété

Tableau-I-2- Analyse transfo CO2

Tableau-I-3-Analyse transformateur TR1 raff 3500

Tableau I-4- Analyse transformateur TR4 raff 3000

Tableau I-5- Analyse local TGBT

Tableau-I-6- Analyse local transfos ECDI/ELB

Tableau-I-7- Disposition des symboles

### Chapitre II Transfert thermique

Tableau-II-1- Analogies entre la loi de Fourier et la loi d'Ohm

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

Tableau II-1- Données géométriques du transformateur.

Tableau-III-2- Données électriques du transformateur.

Tableau-II-3- Matériaux utilisés dans le transformateur.

Tableau-II-4-Les nouvelles valeurs des pertes au niveau des bobines HT et BT.

Tableau-II-5-Les nouvelles valeurs des pertes au niveau des bobines HT et BT.

Tableau-III-6-Les nouvelles valeurs des pertes au niveau des bobines HT et BT.

Tableau-II-7- Les valeurs de la température moyenne de chaque zone dans le transformateur.

Tableau-II-8- Les valeurs de la température moyenne de chaque zone dans le transformateur.

Tableau-II-9- Les valeurs de la température moyenne de chaque zone dans le transformateur.



# **Table des matières**

## Table des matières

Remerciement	
Dédicaces	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	1
Chapitre I: Généralités sur les transformateurs	
I-1 Introduction.....	3
I-2 Transformateur.....	3
I-2-1 Constitution.....	3
I-2-2 Isolation.....	9
I-3 Principe de fonctionnement .....	9
I-4 Les type des transformateurs .....	10
I-4-1 Transformateurs abaisseur et élévateur.....	10
I-4-2 Transformateur de puissance .....	11
I-4-3 Transformateur de distribution .....	12
I-4-4 Transformateur d'instrumentation .....	13
I-4-5 Transformateur de courant.....	13
I-4-6 Transformateur de potentiel.....	14
I-4-7 Transformateur monophasé .....	15
I-4-8 Transformateur triphasé : .....	15
I-5 Pertes dans le transformateur .....	18
I-5-1 Les pertes électriques :.....	18
I-5-2 Les pertes fer.....	18
I-6 Echauffement et refroidissement des transformateurs.....	18
I-6-1 L'échauffement .....	18
I-6-2 Le refroidissement .....	18
I.7 Modes de Refroidissement.....	25
I-8 Protection des transformateurs.....	26
I-9 Conclusion .....	29
Chapitre II: Transfert thermique	
II-1 Introduction .....	30
II-2 Modes de transfert thermique.....	30

II-2-1 Conduction thermique .....	31
II-2-2 Convection thermique.....	32
II-2-3 Transfer thermique par rayonnement .....	33
II-3 Eléments de définition du problème thermique.....	33
II-3-1 Couplage des champs électromagnétique et thermique.....	33
II-3-2 champ de température.....	34
II-3-3 Gradient de température .....	34
II-3-4 Flux de chaleur .....	35
II-4 Modélisation thermique.....	35
II-4-1 Equations de transfert de chaleur par conduction.....	36
II-4-2 L'équation de chaleur dans un milieu à température uniforme .....	38
II-5 Méthodes de résolution des problèmes de thermique.....	40
II-5-1 Les méthodes analytiques .....	40
II-5-2 Les méthodes semi-numériques.....	40
II-5-3 Les méthodes numériques. ....	40
II-6 Conclusion.....	41
Chapitre III: Simulation numérique de transfert thermique dans un transformateur triphasé	
III-1 Introduction .....	42
III-2 Présentation du transformateur étudié.....	42
III-2-1 Les dimensions géométriques .....	42
III-2-2 Les propriétés électriques du transformateur .....	44
III-3 Simulation du problème thermique :.....	45
III.3.1 Equation à résoudre.....	45
III-3-2 Conditions aux limites :.....	46
III-3-3 Organigramme de calcul : .....	47
III-4 Etude du comportement thermique du transformateur en régime permanent.....	48
III-4-1 Effets des pertes sur la répartition de la température dans le transformateur .....	48
III-4-2 Effets de la variation de l'épaisseur des isolants sur la répartition de la température dans le transformateur :.....	52
III-4-3 Effet combiné de la variation de l'épaisseur de l'isolant et des pertes volumiques sur la répartition de la température dans le transformateur.....	55
III-5 Etude du comportement thermique transitoire du transformateur. ....	61
III-5-1 Equation à résoudre.....	61
III-5-2 Conditions aux limites.....	62

III.5.3 Condition initiale .....	62
III-5-4 Organigramme.....	63
III-5-5 Evolution de la température en fonction du temps dans le transformateur étudié	63
III-6 Conclusion.....	72
Conclusion générale .....	73
Références bibliographiques	

# **Introduction générale**

La révolution scientifique et technique qui modèle notre civilisation résulte du progrès de la technologie dans différents domaines. Parmi ces derniers, figure au premier plan l'énergie électrique dont la demande et l'utilisation de plus en plus grandes imposé aux producteurs de cette énergie des adaptations de leurs stratégies de distribution ainsi que les domaines d'exploitation.

En effet, le transformateur est un composant fondamental en électrotechnique, son étude constitue l'un des piliers de cette discipline. Rappelons que le transformateur industriel a été inventé par Lucien Gaulard et John-Dixon Gibbs en 1883, son essor fut immédiat. Les puissances réalisées augmentèrent très rapidement (de quelques 100 KVA en 1990, à quelques MVA en 1910), le transformateur a donc eu un rôle décisif dans le développement de l'énergie électrique.

L'efficacité énergétique des transformateurs est aussi bien liée à sa puissance nominale du transformateur qu'au type de ventilation et du type de refroidissement. En général, Le rendement augmente avec la puissance. Plus le transformateur est puissant plus son rendement est meilleur

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

Ce présent travaille a pour objectif, la mise en œuvre informatique du modèle thermique des transformateur TRIPHASE abaisseur de tension (30 KV / 400 V) couplé en triangle-étoile « Dy », fabriqué par Electro-industrie d'AZAZGA (ex-ENEL) de TIZI-OUZOU

Ce travail est constitué de trois chapitres. Le premier est consacré à la présentation des notions de bases sur le transformateur, les différents types, leur principe de fonctionnement et leurs différents domaines de leur utilisation. Il sera aussi question de leur échauffement et leur refroidissement ainsi que le processus de leur protection.

Dans le deuxième chapitre, il sera question des différents modes de transfert thermique dans les transformateurs et équation régissant le transfert de la chaleur dans les divers matériaux.

Le troisième chapitre sera l'occasion de présenter la mise en œuvre informatique du modèle thermique utilisé pour l'étude du transformateur triphasé (fabriqué par Electro-industrie d'AZAZGA ex-ENEL) et les résultats de diverses simulations numériques(avec ou sans prise en compte de la variation de la température dans le temps) menées dans l'environnement Matlab/Simulink avec le logiciel FEMM basé sur la méthode des éléments finis.

Nous terminerons notre étude par une conclusion générale.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur les transformateurs**



## I-1 Introduction

Les transformateurs ont un rôle fondamental dans tout système de gestion de l'énergie électrique. Celui-ci est nécessaire en phase de production, de distribution, de transport et d'utilisation du courant électrique. Les transformateurs sont rencontrés à tous les niveaux d'un tel système, de la production à l'utilisation.

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les transformateurs, à commencer par leur constitution et en passant par les différents types, ensuite on enchaîne avec l'étude de l'échauffement et les modes de refroidissement

## I-2 Transformateur

Le transformateur est un système qui permet de transférer de l'énergie (sous forme alternative) d'une source à une charge, tout en modifiant la valeur de la tension. La tension peut être soit élevée ou abaissée selon l'utilisation voulue. Le changement d'un niveau de tension à un autre se fait par l'effet du couplage magnétique.

### I-2-1 Constitution

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

- **La partie active** : Constituée essentiellement des circuits magnétique et électrique. Elle est destinée à conversion d'énergie électrique.

- **La partie constructive** : Destinée à assurer l'isolement et la fixation de la partie active [1].

#### I-2-1-1 Partie active

Dans cette partie est assurée la transmission de l'énergie électrique de la source vers la charge par la circulation du courant dans le circuit électrique et du flux magnétique dans le circuit magnétique.

**a- Le noyau (circuit magnétique) :**

Le circuit magnétique est constitué d'un empilement de tôles d'acier de bonne qualité, de plus pour minimiser les pertes dans le fer, les pertes par courant de Foucault et par hystérésis qui se produisent lors de la variation périodique du flux magnétique, les tôles utilisées sont en acier doux et ont une faible épaisseur et sont isolées entre elles avec du vernis. Le circuit se présente sous forme de trois colonnes et deux culasses, son rôle essentiel est de canaliser le flux avec le minimum de pertes par hystérésis et courant de Foucault.

Suivant la forme du circuit magnétique, on distingue deux dispositions principales qui sont :

- Transformateur à colonnes.
- Transformateur cuirassé.

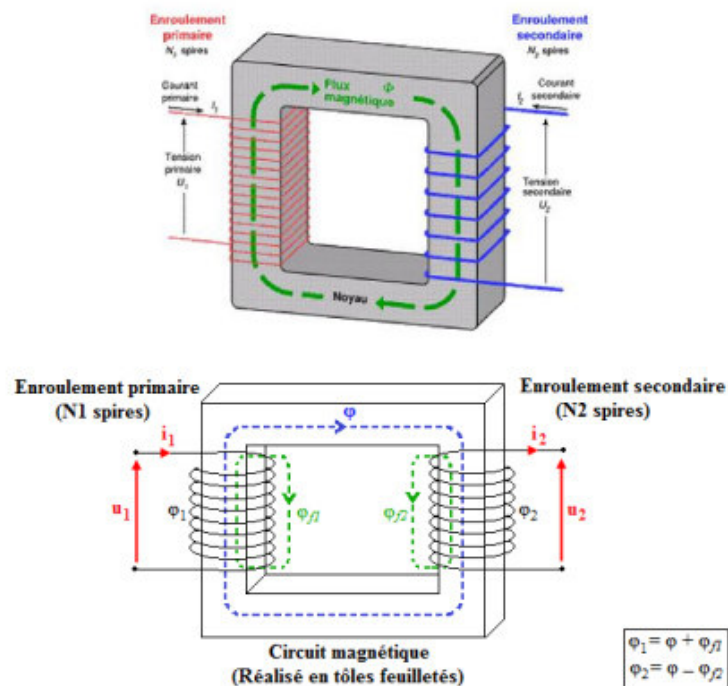


Figure-I-1-circuit magnétique d'un transformateur

**a.1 Transformateur cuirassé :**

Pour ce type de transformateur, le circuit magnétique entoure complètement l'enroulement des deux côtés. La cuve assure le serrage de l'ensemble et le transformateur ainsi constitué est alors assuré d'une excellente rigidité mécanique associée à une grande compacité. Ces transformateurs sont utilisés principalement au sein des réseaux de transport et de répartition,

ou les surtensions transitoires sont fréquentes. Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobines [1].

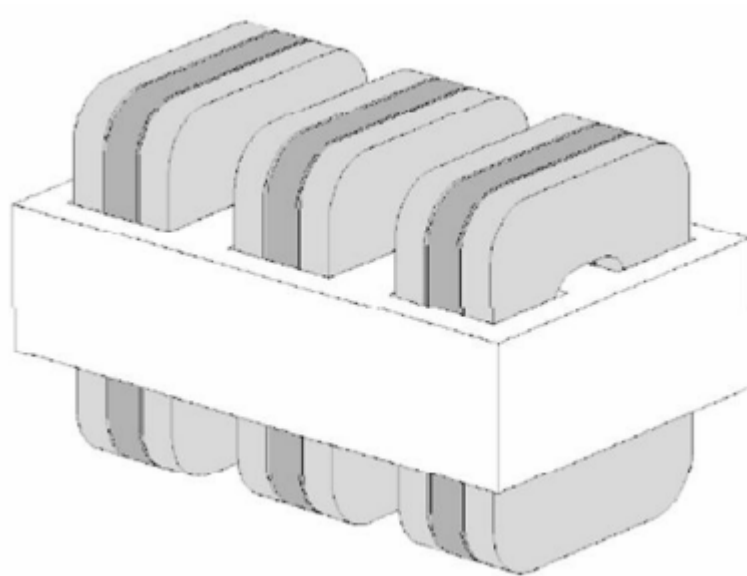


Figure-I-2- transformateur cuirassé.

### **a.2 Transformateur à colonne :**

Le transformateur à colonne est constitué de deux enroulements concentriques par phase. Ces enroulements sont montés sur le noyau ferromagnétique qui se referme à ses extrémités via des culasses afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique.

Dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique de manière à maximiser le couplage tout en minimisant le volume des conducteurs. Cette disposition plus simple que la précédente est utilisée pour les transformateurs à haute tension et les grandes puissances. Les enroulements peuvent être disposés sur un circuit magnétique comportant trois colonnes ou noyaux, ce type de circuit magnétique est dit à flux forcé. Si le déséquilibre est important, on utilise les transformateurs à quatre ou cinq colonnes, dont trois sont bobinées, les autres servent au retour des flux.

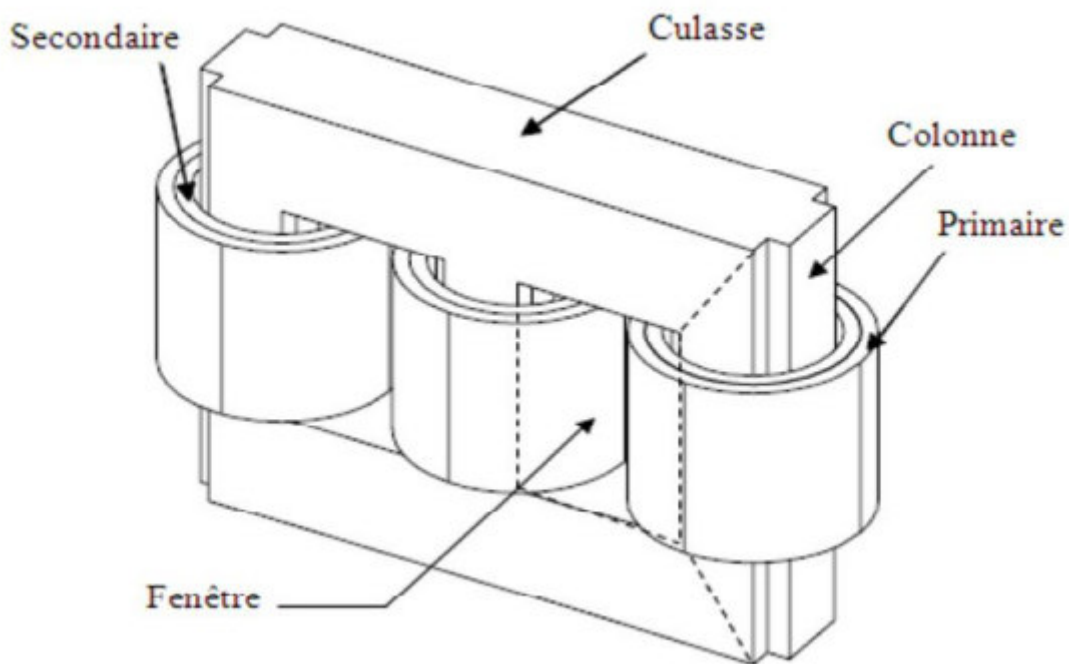


Figure-I-3- transformateur à colonnes

**b. Bobinage (Le circuit électrique) :**

Le transformateur est constitué d'un primaire et d'un secondaire constitué chacun de trois enroulements identiques. Ces enroulements du transformateur sont les parties qui assurent, grâce aux phénomènes de l'induction électromagnétique, le transfert de puissance entre l'enroulement primaire et l'enroulement secondaire.

Les enroulements sont réalisés soit en cuivre ou en aluminium. Les bobinages sont effectués avec du fil rectangulaire isolé en papier en multicouches, en disque ou hélicoïdal.

Il y en a deux par colonne, l'un forme l'enroulement primaire et l'autre le secondaire tous deux électriquement distincts.

On désigne par les grandes lettres (A. B. C) les bornes d'enroulement haute tension et par les petites lettre (a. b. c) les bornes de la basse tension.

Les enroulements prennent différentes dispositions : en couche concentriques, et bi-concentriques et à galettes.

**b.1 Les bobinages concentriques :** Les enroulements sont constitués de deux bobines cylindriques.

**b.2 Les bobinages en galettes :** Les enroulements sont constitués de galettes superposées et alternées appartenant successivement au primaire et au secondaire, et séparées les uns des autres par une rondelle isolante.

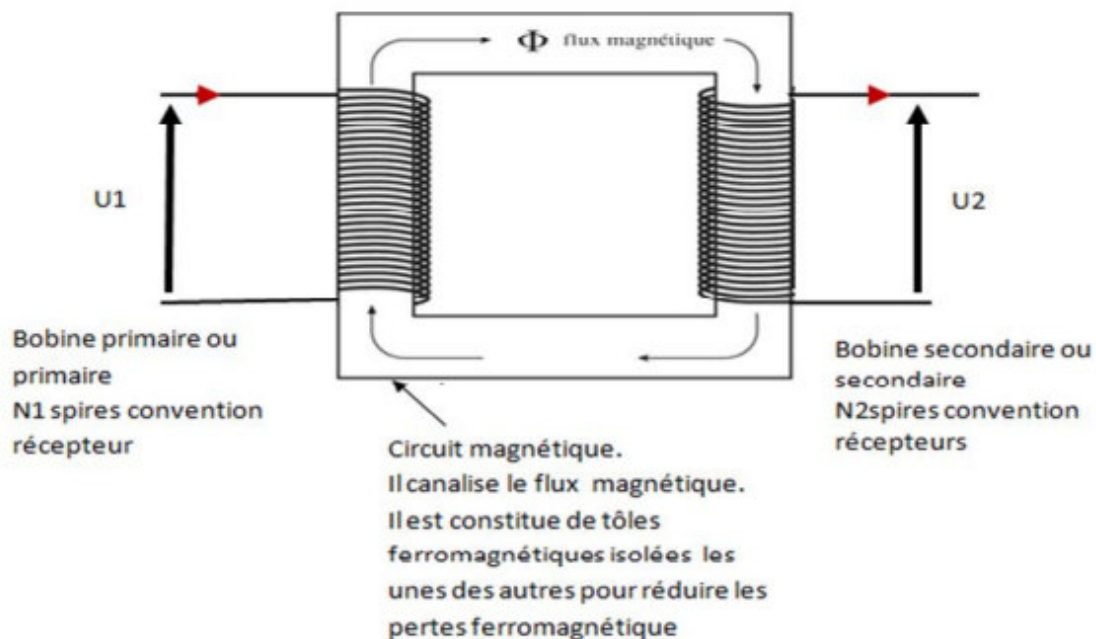


Figure-I-4-bobines primaire et secondaire d'un transformateur.

### c) Représentation des enroulements :

- **Enroulement haute tension :**

Le courant circulant dans l'enroulement est à faible intensité mais la tension très élevée à laquelle il est soumis impose une section de conducteur plus faible et l'enroulement qui comporte le nombre de spires le plus élevé est l'enroulement haut tension.

- **Enroulement basse tension :**

Le courant circulant dans cet enroulement est d'intensité très grande mais de niveau de tension plus bas. Pour la réalisation de cette caractéristique, on impose un nombre de spires limité, et une section des conducteurs relativement importante.

### I-2-1-2 La partie constructive

Les pièces constructives du transformateur sont [1].

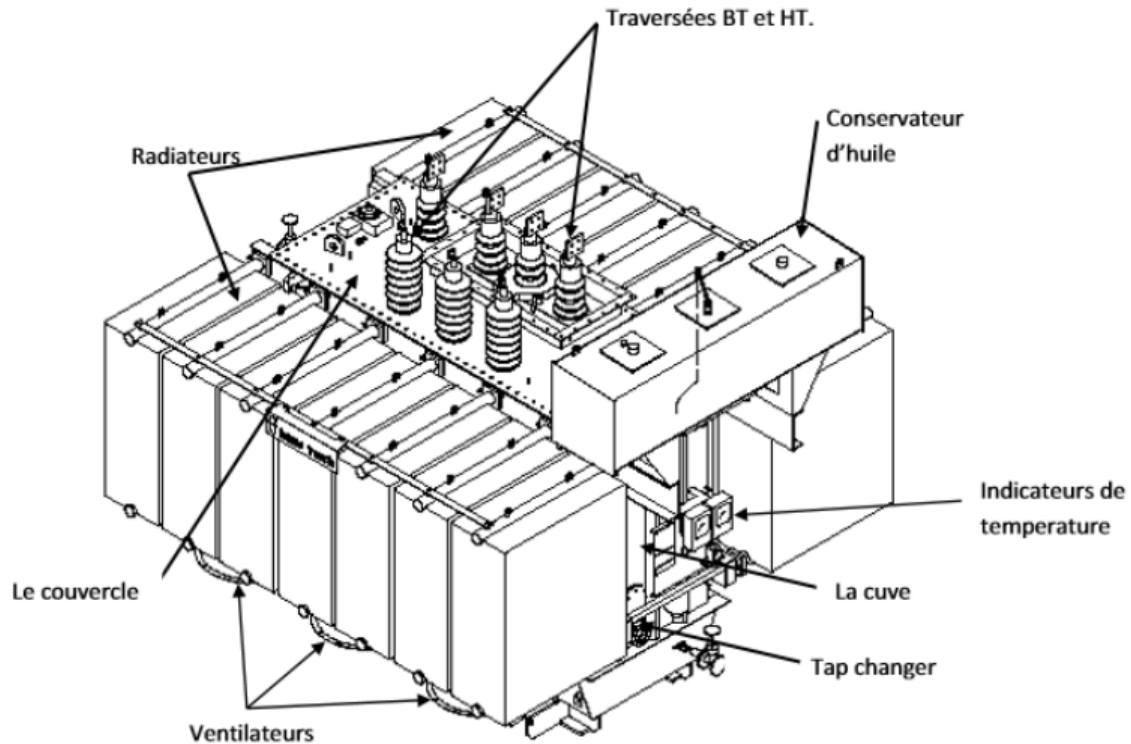


Figure-5- Représentation de la partie constructive.

- **La cuve :**

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

- **Le couvercle :**

Il sert à couvrir la cuve. Il sert aussi de support aux accessoires, tels que : les isolateurs, le conservateur d'huile...

- **Le conservateur d'huile :**

Il permet le remplissage de la cuve et réduit la surface de l'huile en contact avec l'air extérieure humide.

- **Les isolateurs (HT) :**

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

- **Les traversées (BT) :**

Elles sont au nombre de quatre et sont formés de deux parties placées de part et d'autre du couvercle et reliées par une tige entre les extrémités du secondaire (BT) et les lignes de départ.

### I-2-2 Isolation

L'isolation des transformateurs de puissance est constituée d'huile et d'isolants celluloseux (papiers). Ces matériaux ont des propriétés qui se complètent, pour permettre de réaliser l'isolement entre spires, entre bobinages, ou entre bobinages et masse, et de conférer à l'ensemble une cohésion suffisante, pour supporter les efforts mécaniques, tout en assurant l'évacuation des pertes dissipées dans les enroulements (cuivre). L'isolation diélectrique qu'elle soit solide ou liquide doit permettre au transformateur de résister à la fois à la tension alternative en régime permanent et aux surtensions transitoires sans décharge électrique. Pour ce faire, elle doit homogénéiser le champ électrique dans le transformateur [1].

### I-3 Principe de fonctionnement

Le transformateur est constitué de deux enroulements (ou plus) couplés sur un noyau magnétique, comme à la figure -I-6- Le côté de la source est appelé le **primaire**, et a  $N_1$  tours de fils (spires). Le côté de la charge est appelé le **secondaire** et a  $N_2$  spires. Le flux  $\phi$  est le flux mutuel. Le "●" indique la polarité des tensions. Par convention, un courant qui entre dans un "●" indique un flux positif.

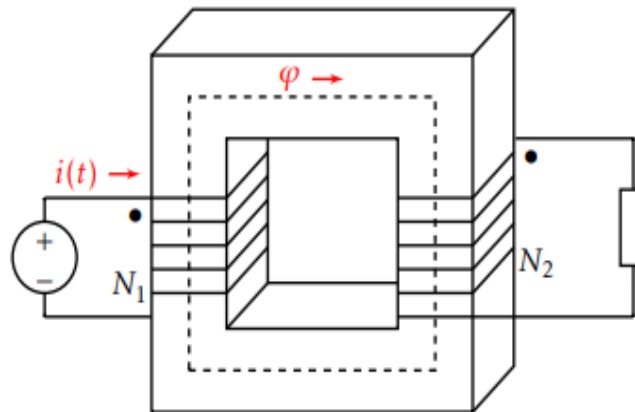


Figure-I-6- Transformateur monophasé.

Il faut remarquer qu'il n'existe aucune connexion électrique entre le primaire et le secondaire. Le couplage entre les deux enroulements est de type magnétique.

Lorsqu'on applique une tension alternative à la source, ceci crée un flux alternatif dans le noyau magnétique. Selon la loi de Faraday, ce flux crée des forces électromotrices dans les bobines. La force électromotrice induite est proportionnelle au nombre de tours dans la bobine et au taux de variation du flux. Selon le rapport du nombre de tours entre le primaire et le secondaire, le secondaire alimente la charge avec une tension différente de celle de la source [2].

#### I-4 Les type des transformateurs

Il y'a plusieurs types de transformateurs utilisés dans les systèmes d'alimentation électrique à différents niveaux tels que la production, la distribution, la transmission et l'utilisation de l'énergie électrique. Les différents types de transformateurs sont : transformateur élévateur, et transformateurs abaisseur, transformateur de puissance, transformateur de distribution, transformateur d'instrument comprenant transformateur de courant et de potentiel, transformateur monophasé et triphasé, transformateur automatique, ect [3].

##### I-4-1 Transformateurs abaisseur et élévateur

Ce type de transformateur est classé sur la base d'un rapport du nombre de tours dans les enroulements primaire et secondaire.



Le transformateur élévateur transforme une basse tension et courant élevé dans un système alternatif en une haute tension et courant faible à la même fréquence. Pour cela, le nombre de tours dans l'enroulement secondaire est supérieur au nombre de tours dans l'enroulement primaire.

Le transformateur abaisseur convertit une tension primaire élevée associée au faible courant en une basse tension associée à un courant élevé. Dans ce cas, le nombre de tours dans l'enroulement primaire est supérieur au nombre de tours dans l'enroulement secondaire.

#### **I-4-2 Transformateur de puissance**

Les transformateurs de puissance sont utilisés dans les réseaux de transmission de tension plus élevées. Les caractéristiques normales du transformateur de puissance sont les suivantes : 400KV, 200KV, 110KV, 66KV et 33KV. Ils sont principalement évalués au-dessus de 200 MVA. Principalement installé dans les centrales et les sous-stations de transport. Ils sont conçus pour une efficacité maximale de 100% leur taille est supérieure à celle d'un transformateur de distribution.

À très haute tension, la puissance ne peut pas être distribuée directement au consommateur, de sorte que le courant passe au niveau souhaité à l'aide du transformateur d'alimentation abaisseur. Le transformateur n'est pas complètement chargé, ce qui entraîne des pertes fer pendant toute la journée, mais les pertes dans le cuivre sont basées sur le cycle de charge du réseau de distribution.

Le transformateur reste chargé h24, les pertes fer et dans le cuivre se produisent pendant toute la journée. Le transformateur de puissance est rentable lorsque l'énergie est générée à des niveaux de tension faibles. Si le niveau de tension est élevé, le courant du transformateur de puissance est réduit, ce qui entraîne des pertes Joule [3].

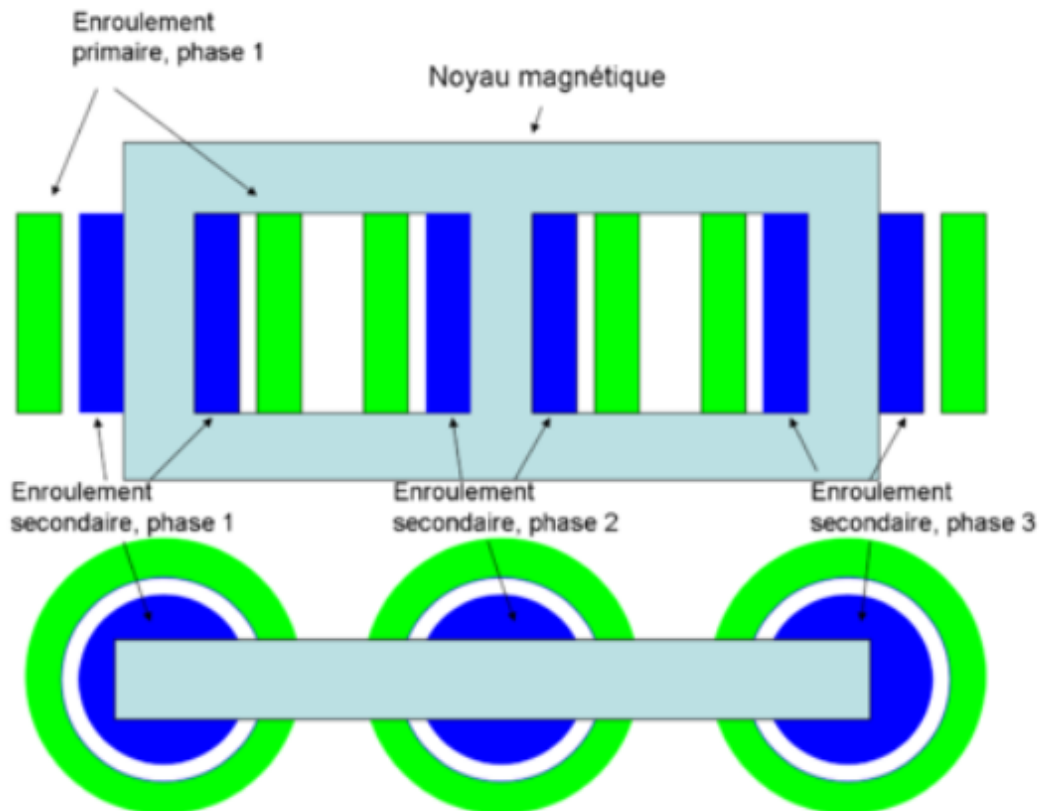


Figure-I-7-Transformateur de puissance.

### I-4-3 Transformateur de distribution

Ce type de transformateur se présente à des cotes différentes comme 11KV, 6.6KV, 3.3KV, 440V et 230V. Ils ont une puissance nominale inférieure à 200MVA et sont utilisés dans le réseau de distribution pour transformer la tension dans le réseau électrique en l'abaissant au niveau de la tension où l'énergie électrique est distribuée et utilisée du côté du consommateur. L'enroulement primaire du transformateur de distribution est enroulé par un fil de cuivre. Un ruban épais en aluminium et en cuivre, est utilisé pour faire du secondaire du transformateur un enroulement à haute intensité et basse tension. Le papier imprégné de résine et l'huile sont utilisés pour l'isolation [3].

L'huile dans le transformateur est utilisée pour

- Refroidissement
- Isoler les enroulements

- Protéger de l'humidité

Les différents types de transformateurs de distribution sont classés par catégories :

- Lieu de montage
- Type d'isolation
- Nature de l'offre

#### **I-4-4 Transformateur d'instrumentation**

Ils sont généralement conçus à des fins d'isolation. L'utilisation la plus courante du transformateur d'instrumentation consiste à isoler en toute sécurité l'enroulement secondaire lorsque le primaire est alimenté en haute tension et en courant afin que l'instrument de mesure, les compteurs d'énergie ou les relais connectés au secondaire d'un transformateur ne soient pas endommagés.

Le transformateur d'instrument est en outre divisé en deux types

- Transformateur de courant (CT)
- Transformateur de potentiel (PT)

Le transformateur de courant et de potentiel est expliqué ci-dessous en détail

#### **I-4-5 Transformateur de courant**

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

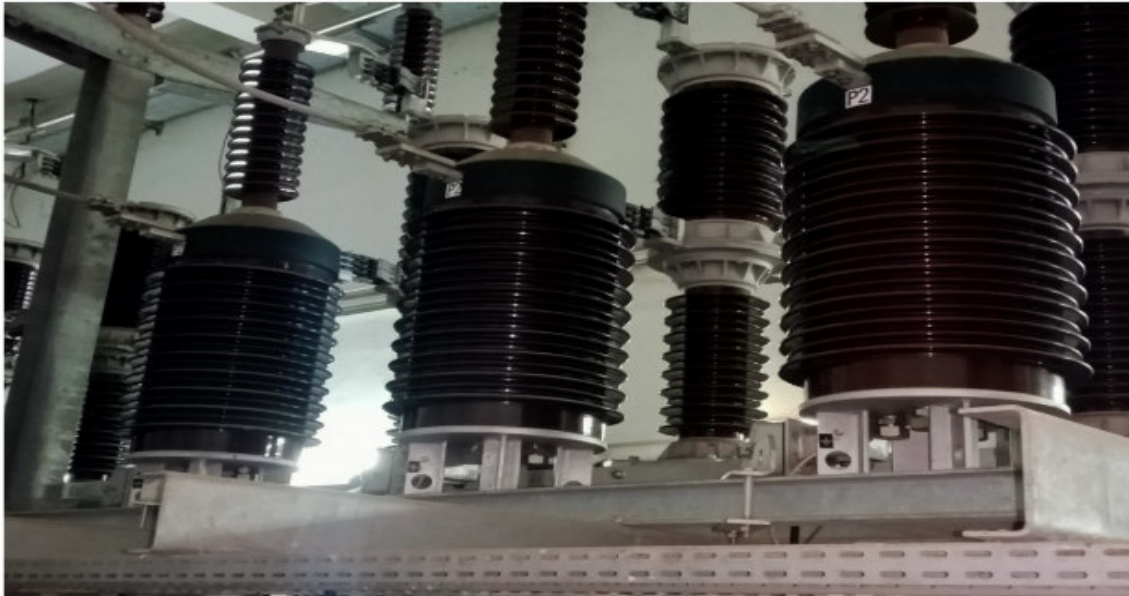


Figure-I-8-Transformateurs de courant.

#### I-4-6 Transformateur de potentiel

Le transformateur de potentiel est aussi appelé transformateur de tension. L'enroulement primaire est connecté sur la ligne à haute tension dont la tension doit être mesurée et tous les instruments de mesure et les compteurs sont connecté au côté secondaire du transformateur. La fonction principale du transformateur de potentiel consiste à abaisser le niveau de tension jusqu'à une limite ou valeur voulue.

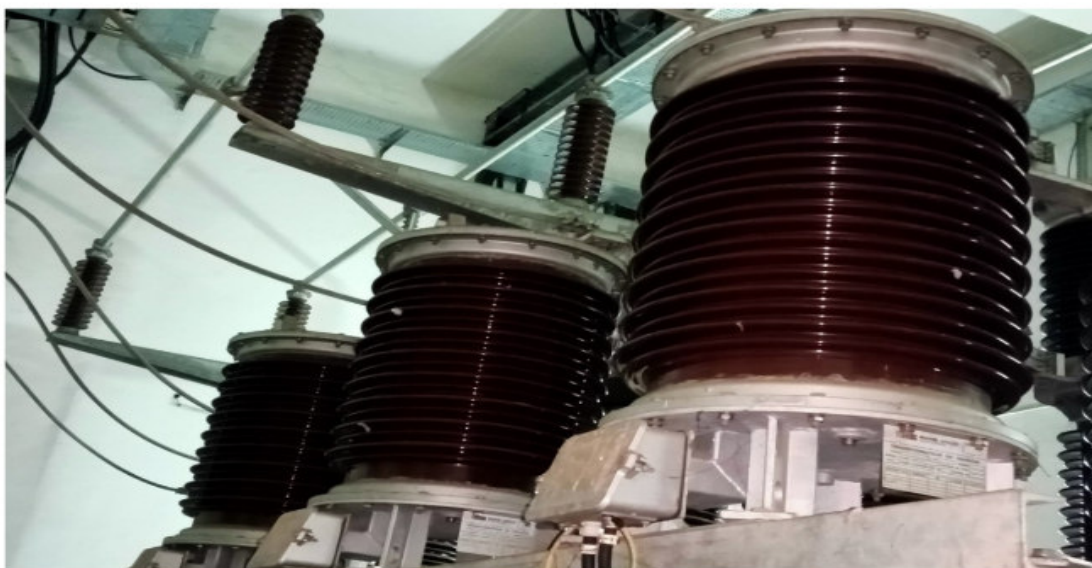


Figure-I-9-Transformateurs de tension.

### I-4-7 Transformateur monophasé

Un transformateur monophasé est un transformateur dont le primaire est un enroulement monophasé alimenté par une tension monophasée et l'enroulement secondaire est une bobine qui alimente une charge monophasée également.

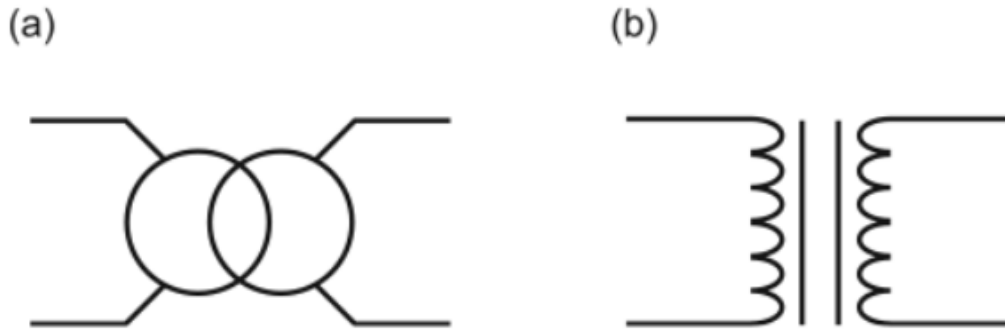


Figure-I-10-symbole de transformateur monophasé.

### I-4-8 Transformateur triphasé :

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

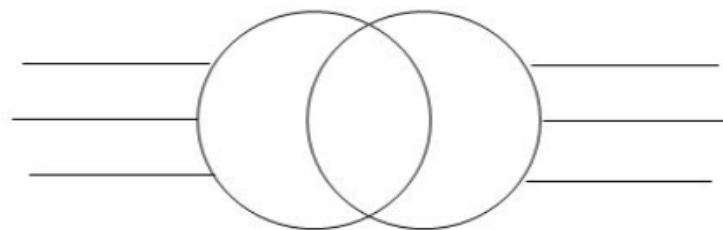


Figure-I-11- symbole du transformateur triphasé.

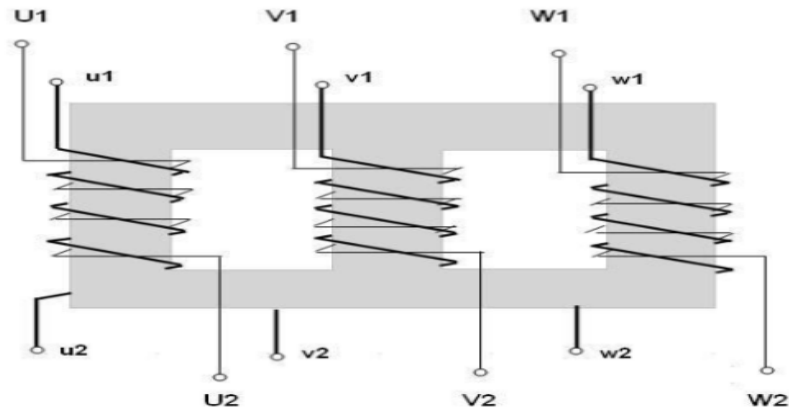


Figure-I-12- Transformateur triphasé.

Les tensions simples sont  $v_1, v_2$ .

Les tensions composées sont  $U_1, U_2$ .

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

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

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

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

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

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

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

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

**L'indice horaire dépend du couplage**

**Exemple :**

Couplage **D yn 11**

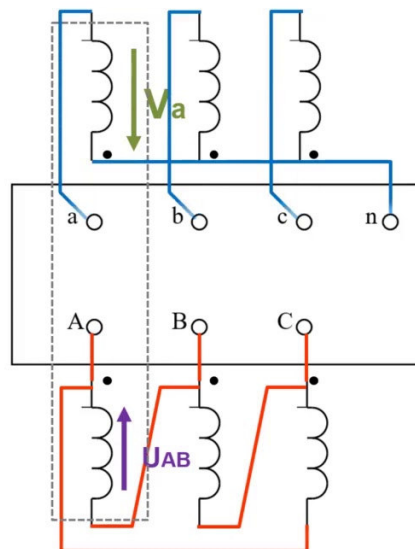
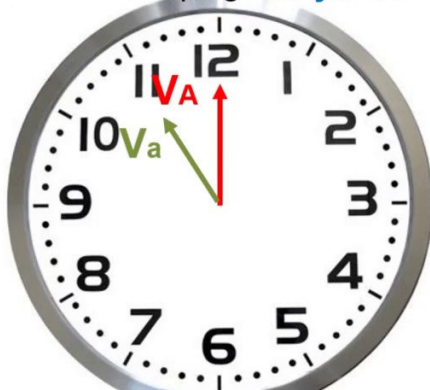


Figure-I-13- Indice horaire

Un transformateur triphasé est désigné par un symbole associant son groupe de couplage et son indice horaire. Par exemple, un transformateur triangle-étoile ayant un indice horaire est désigné par Dy11. Trois couplages sont particulièrement utilisés en pratique : ce sont les couplages normalisés Yy0, Dy11, et Yz11. [4]

## **I-5 Pertes dans le transformateur**

### **I-5-1 Les pertes électriques :**

Ce sont les pertes par effet joule qui se produisent dans les enroulements, elles dépendent de la résistance de ces enroulements et de l'intensité du courant qui les traverse.

### **I-5-2 Les pertes fer**

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

#### **I-5-2-1 Les pertes par hystérésis**

Le phénomène d'hystérésis s'explique par un retard de l'induction sur le champ magnétique appliqué aux matériaux du circuit magnétique. Ce retard provoque une perte d'énergie sous forme de chaleur, à chaque cycle du courant alternatif.

#### **I-5-2-2 Les pertes par courant de Foucault**

Le circuit magnétique qui est le siège de l'induction alternative, est parcouru par des courants induits appelés « **courant de Foucault** ». Ils produisent par effet joule un dégagement de chaleur au sein du circuit magnétique. Pour les réduire, on feuillette et on empile les tôles puis on les isole entre elles.

## **I-6 Echauffement et refroidissement des transformateurs**

### **I-6-1 L'échauffement**

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

### **I-6-2 Le refroidissement**

Lors de son fonctionnement, un transformateur est le siège de pertes, dont la plus grande partie est localisée dans deux éléments principaux : [5]



- Le circuit magnétique : Ces pertes dépendent de l'induction c'est-à-dire de la tension appliquée.

- Les enroulements : les pertes de cuivre qui dépendent du courant de charge.

En dernier lieu les flux de fuites sont susceptibles d'induire dans les pièces avoisinantes non actives (pièces de serrage, cuve, couvercle) des courants de Foucault qui entraînent des pertes parasites.

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

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

**Matériels utilisés :** on utilise les matériels suivants :

- Caméras thermiques Flir E85 et E95.
- Multimètre.
- **Définition des ordres de priorités :**

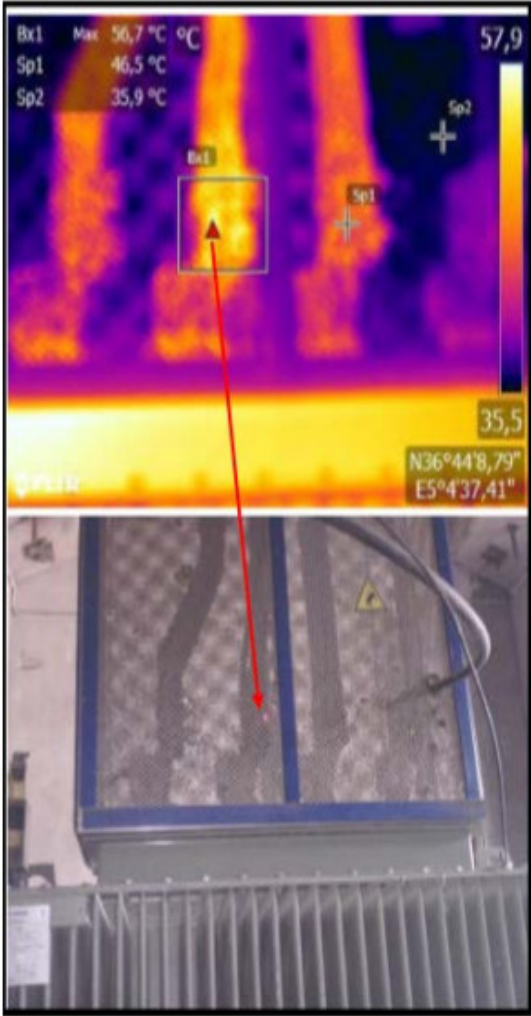
Priorité	Écart Temp.	Température max des câbles	Mesure à prendre
1	> 50°C	> 100°C	Réparation immédiate.
2	30°C à 50°C	80 à 100°C	Réparation dès que possible, dans la semaine.
3	10°C à 30°C	70°C à 80°C	Réparation lors de la prochaine routine de maintenance.

Tableau-I-1- Ordres de propriété

Des thermo-grammes sont enregistrées pour chacun des éléments où un écart de température supérieur à 10°C a été détecté, soit par rapport à une valeur de référence ou à un élément identique soumis à une charge de courant comparable [5].

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

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



**Propriété**

**2**

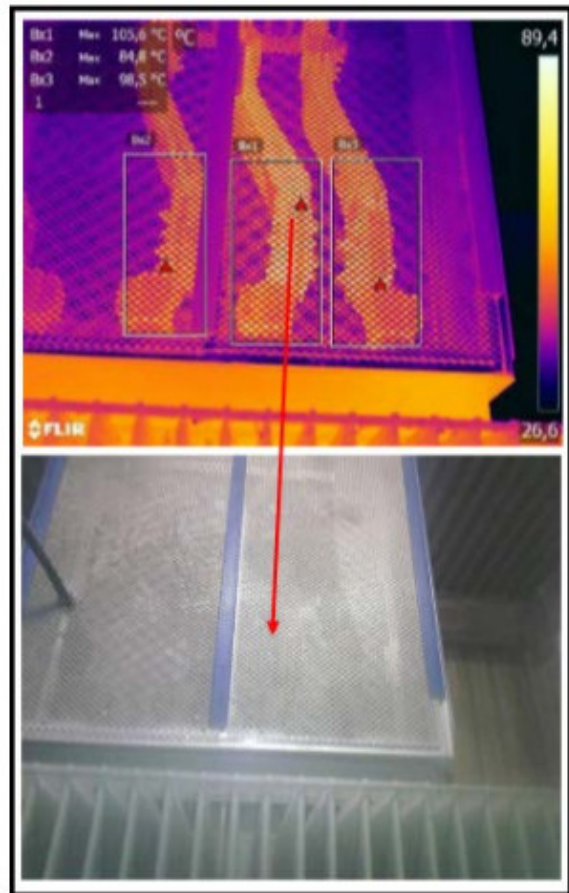
**Analyse :**

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

Tableau-I-2- Analyse transfo CO2.

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

Distance de prise de vue en (m)	1
Emissivité	0.85
Objectif	42°
Ambiance du local T°C	26
T°C maximale observée(Tmax)	<b>105.6</b>
T°C équipement similaire	84.8
$\Delta T^\circ\text{C Tmax} - T^\circ\text{C}$ équipement Sim	<b>20.8</b>



**Propriété**

**3**

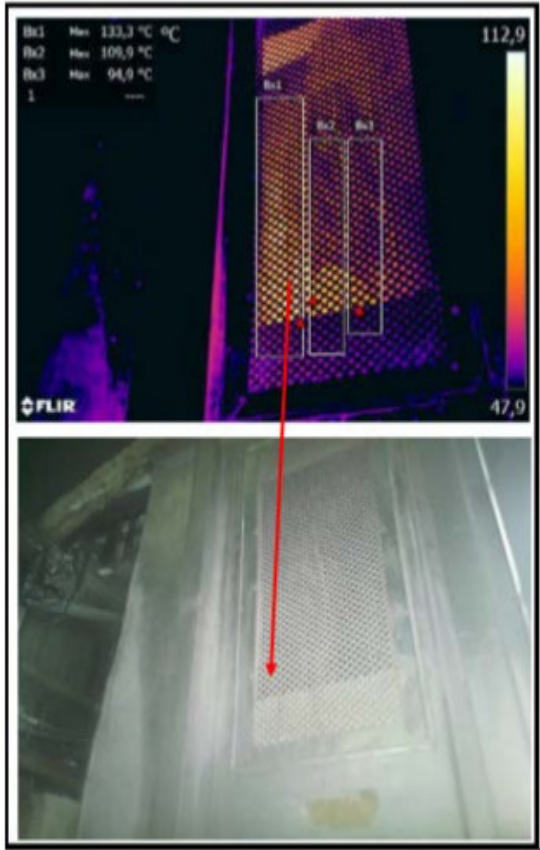
**Analyse :**

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

Tableau-I-3-Analyse transformateur TR1 raff 3500 [5].

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

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



**Propriété**

**2**

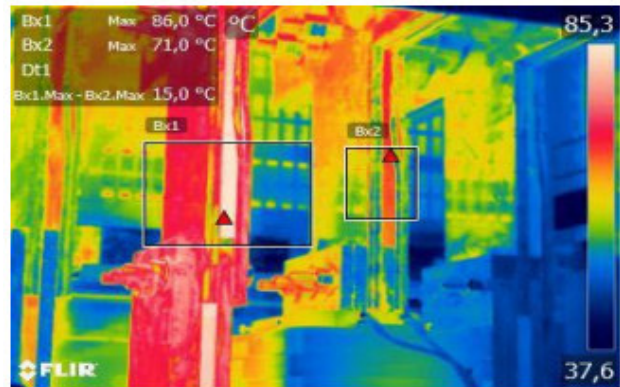
**Analyse :**

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

Tableau I-4- Analyse transformateur TR4 raff 3000.

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

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



**Propriété**

**3**

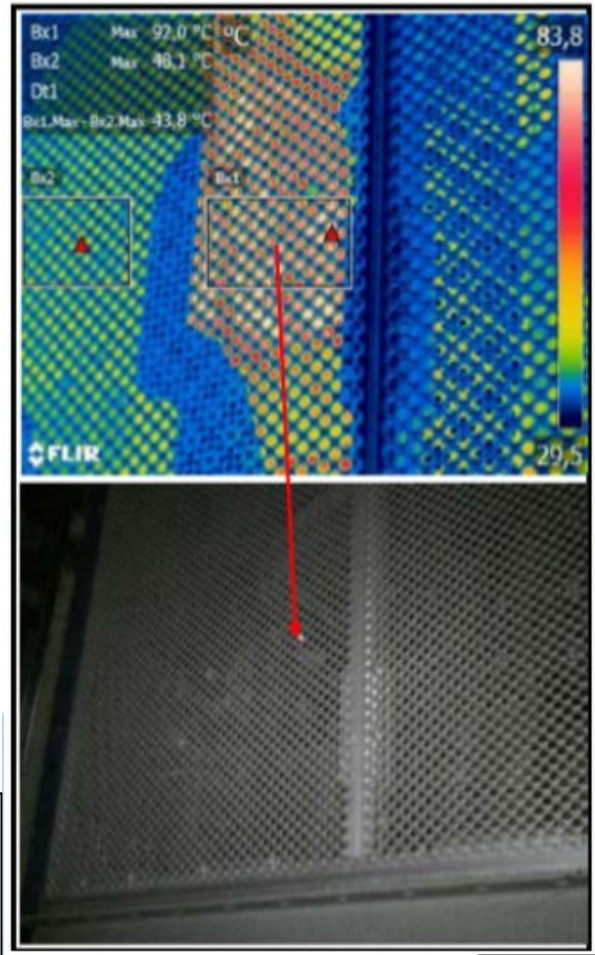
**Analyse :**

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

Tableau I-5- Analyse local TGBT [5].

Local : local transfos ECDI/ELBE  
 Equipement : Transfos ECDI - Composant : jeux de barre

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



propriété  
**2**

**Analyse :**

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

Tableau-I-6-Analyse local transfos ECDI/ELB [5].

**I.7 Modes de Refroidissement**

Le mode de refroidissement est désigné par le constructeur au moyen de quatre lettres, le tableau suivant indique la disposition des symboles [5]:

1 <sup>ère</sup> lettre	2 <sup>ème</sup> lettre	3 <sup>ème</sup> lettre	4 <sup>ème</sup> lettre
Nature du diélectrique	Mode de circulation du diélectrique	Fluide de refroidissement	Mode de circulation du fluide
O : huile minérale L : Diélectrique chloré G : gaz A : Air S : Isolant solide	N : Naturel F : Forcée D : Forcée et Dirigée dans les enroulements	Mêmes symboles que la 1 <sup>ère</sup> lettre	Mêmes symboles que la 2 <sup>ème</sup> lettre

Tableau-I-7 Disposition des symboles



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

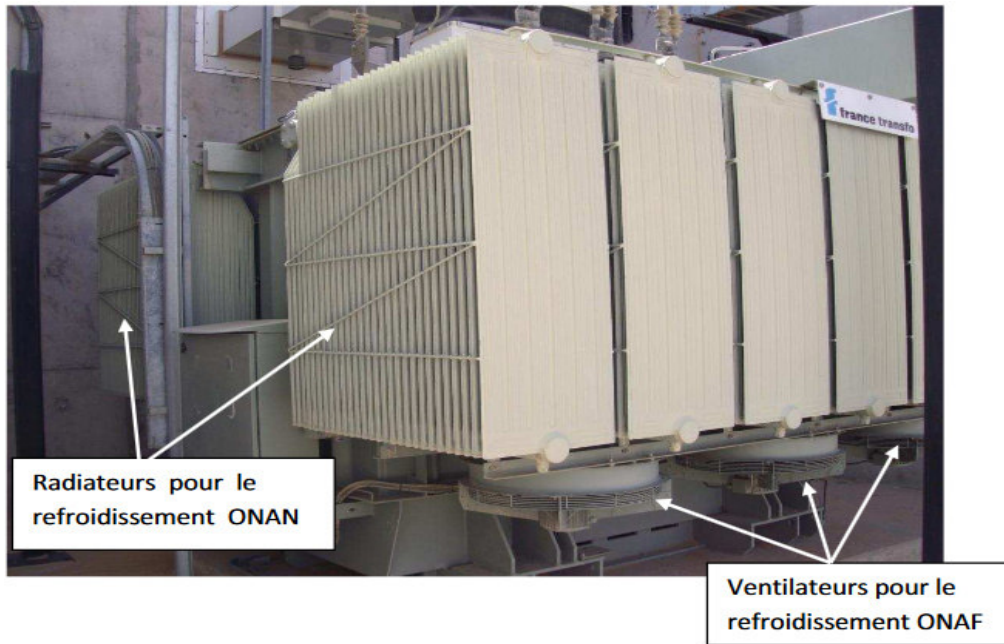


Figure-I-14- Les modes de refroidissement de transformateur.

- **Le système de refroidissement naturel ONAN :**

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

- **Le système de refroidissement forcé ONAF :**

Ce système de refroidissement est assuré par l'huile qui est dans la cuve, les radiateurs munis d'ailettes et le système de ventilation forcée d'un important flux d'air. Ces ventilateurs sont couplés à un système de capteurs de température faisant office de thermostat (commande automatique de la mise en route de la ventilation).

## I-8 Protection des transformateurs

Elle dépend du type de transformateur et de la nature de l'incident [5]

- Surtension d'origine atmosphérique, protection par les éclateurs ou parafoudre.



- Court-circuit protection en amont par détection et action très rapide de la disposition de coupure (disjoncteur ou combiné interrupteur-fusible).
- Surcharge protection thermique par le relais ou sonde thermostatique qui envoie un signal d'alarme et (ou) de déclenchement de dispositif de coupure.
- Cas des transformateurs immergés, transformateurs immergés sont sujets à plusieurs défauts spécifiques :
  - Un dégagement gazeux : avec le temps les isolants peuvent fuir, entraînant une pyrolyse du diélectrique et un dégagement gazeux.
  - Une surpression de la cuve : conséquence d'un court-circuit.
  - Une élévation de la température du diélectrique : à cause d'une surcharge ou d'un problème interne.
- La protection interne est assurée par un relais Buchholz qui détecte un dégagement gazeux ou une fuite d'huile.
- Transformateur à remplissage intégrale, la protection interne est assurée par un module DGPT qui détecte à la fois un dégagement gazeux (DG) une augmentation de pression (P), et une augmentation de température.

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

### **a- Relais Buchholz :**

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



Figure-I-15-Relai de buchholz.

### a-1- Rôle :

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

Il convient donc :

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

### a-2- Fonctions :

Au niveau du transformateur, surveillance :

Du Dégagement Gazeux...D G.

De la Pression de cuve...P.

De la Température... T2 (2 seuils).

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

**b- Thermomètre :**

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



Figure-I-16-Thermomètre.

**I-9 Conclusion**

Dans ce chapitre on a présenté les deux parties essentielles du transformateur (partie active et partie constructive) et le principe de fonctionnement des transformateurs en générale. Ensuite, on a donné une présentation générale sur les types des transformateurs et leurs Systèmes d'échauffement et refroidissement. Nous avons, aussi, présenté dans ce chapitre les moyens de protection des transformateurs.

# **Chapitre II**

## **Transfert thermique**

## II-1 Introduction

Un transfert thermique est un transfert d'énergie microscopique désordonnée. Cela correspond en réalité à un transfert d'agitation thermique entre particules, au gré des chocs aléatoires qui se produisent à l'échelle microscopique [8].

L'exemple le plus courant de situation mettant en jeu un transfert thermique est le système constitué de deux corps en contact et ayant des températures différentes. Le corps le plus chaud cède de l'énergie sous forme de chaleur au Corps le plus froid. Il y a transfert thermique entre les deux corps. Dans ce chapitre, nous présenterons les différents modes de transfert de chaleur et la mise en équations relative à chacun des modes. Une revue des différentes méthodes de résolution des problèmes thermiques sera aussi exposée.

## II-2 Modes de transfert thermique

L'étude des transferts thermiques, appelé plus communément chaleur, est l'un des modes, les plus connus d'échange d'énergie. Lorsqu'une différence de température entre deux points d'un système donné se produit, on constate une tendance à l'égalisation des températures. On dit qu'il y a transfert de chaleur.

Le transfert de chaleur obéit aux principes fondamentaux de la thermodynamique. Ce type d'étude fait intervenir plusieurs disciplines de la physique : la mécanique, mécanique des fluides et la thermodynamique...etc. Un certain nombre de ses lois sont établies d'une façon empirique à partir de l'observation de phénomènes physiques et de mesures expérimentales.

La résolution de ces problèmes est souvent complexe car le transfert de chaleur peut résulter de trois mécanismes de propagation obéissant à des lois bien différentes et mises en jeu parfois simultanément.

- La conduction ou diffusion : le transfert d'énergie entre objet en contact physique.
- La convection : le transfert d'énergie entre un objet et son environnement dû à un mouvement fluide.
- Le rayonnement : le transfert d'énergie par l'émission de rayonnement électromagnétique [6].

### II-2-1 Conduction thermique

Le transfert par conduction est un échange d'énergie se réalisant sans déplacement de matière : il concerne donc les solides et les fluides immobilisés. Ce transfert peut se réaliser au sein d'un seul corps ou par contact entre deux corps. L'énergie thermique, ou vibration des atomes autour de leur position d'équilibre dans le solide, se transmet de proche en proche par un phénomène de diffusion. Les cristaux disposent d'un mode de transfert thermique supplémentaire particulier associé aux vibrations du réseau. Dans le cas le plus simple d'une paroi solide d'épaisseur  $e$  dont les deux surfaces d'aire  $S$  présentent une différence de température homogène  $T_1 - T_2$ , le flux thermique dépend de la conductivité thermique  $\lambda$  du matériau ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) :

$$\phi_{1 \rightarrow 2} = \lambda S \frac{T_1 - T_2}{e}$$

Pour une étude plus approfondie, il faut exploiter la loi de Fourier

$$\phi = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T$$

C'est une loi de diffusion similaire à la loi de Fick qui décrit la diffusion de la matière

Avec :

$\lambda$  : la conductivité thermique du matériau en [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

$\phi$  : la densité de flux de la chaleur [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]

$T$  : la température [K]

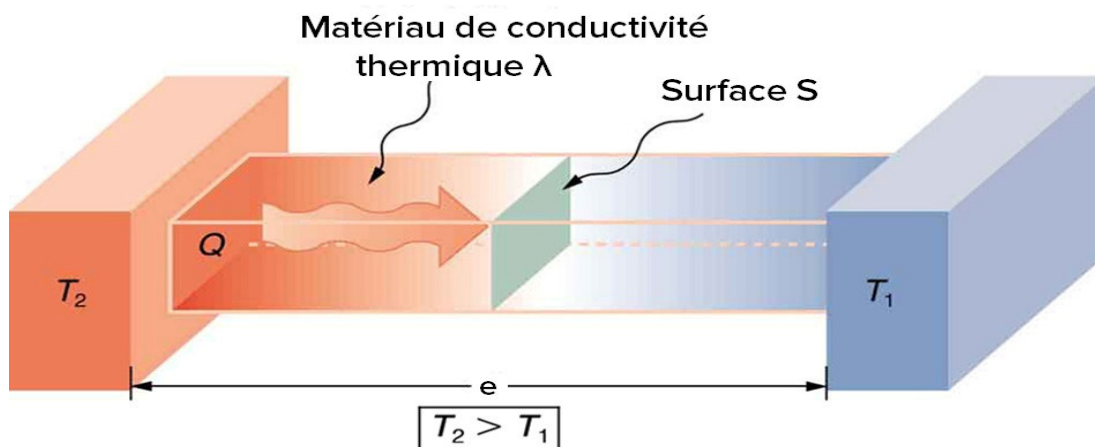


Figure II-1 : Conduction ou diffusion thermique dans un solide sous une différence de température.

## II-2-2 Convection thermique

Le transfert thermique par convection est dû au déplacement de molécules qui induit un déplacement macroscopique de l'énergie thermique. Il se produit dans les fluides (liquides ou gaz) et à l'interface entre un solide et un fluide. Ces molécules se déplaçant, elles transfèrent leur énergie thermique de proche en proche à une autre partie du système. On peut distinguer deux types de convection [5] :

- La convection naturelle (ou libre) est due à la différence de masse volumique entre les particules composant le fluide. Les particules des zones chaudes, de masse volumique plus faible, montent et laissent leur place à des particules plus froides ; elles cèdent une partie de l'énergie thermique et leur température diminue, ce qui les pousse à rejoindre une partie plus chaude.
- La convection forcée est due à la mise en mouvement du fluide par une action extérieure comme l'effet d'un ventilateur. Le mouvement forcé du fluide accélère le transfert thermique.

Dans le cas le plus simple d'une paroi solide de surface  $s$  et de température homogène  $T_1$  en contact avec un fluide à la température  $T_2$  à grande distance de la paroi, le flux thermique dépend du coefficient de convection thermique  $h$  du matériau ( $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ )

$$\phi_{1 \rightarrow 2} = h S (T_1 - T_2)$$

Autrement écrit 
$$\phi = h (T_1 - T_2)$$

La détermination de ce coefficient est considérée comme le problème de la convection. Cependant, le problème n'est pas simple, car en plus de dépendre de nombreuses propriétés du fluide telles que la densité, la viscosité, la conductivité thermique et la chaleur spécifique, les coefficients dépendent de la géométrie de surface et des conditions d'écoulement. Cette multiplicité de variables indépendantes est attribuable à la dépendance du transfert convectif aux couches limites de vitesse et thermique qui se développent en surface. L'importance de ce paramètre (coefficient de transfert de chaleur par convection) qu'il soit obtenu théoriquement, expérimentalement ou numériquement, réside dans le fait de le représenter en termes de seulement trois nombres sans dimension, au lieu des sept paramètres dimensionnels d'origine sous la forme du théorème pi de Buckingham [10]. Cette partie dépasse le cadre de ce travail, nous nous contenterons de prendre des valeurs arbitraires qui se situent dans les limites de la théorie sur la convection.

### II-2-3 Transfert thermique par rayonnement

Le transfert par rayonnement est provoqué par un rayonnement électromagnétique, appelé rayonnement thermique. Il dépend des propriétés de la surface et de son orientation. Pour une surface S (Figure II.2), le flux thermique surfacique, qui équivaut à une existence énergétique, s'exprime par la loi de Stefan-Boltzmann :

$$\Phi_{\text{ray}} = \varepsilon \sigma T^4$$

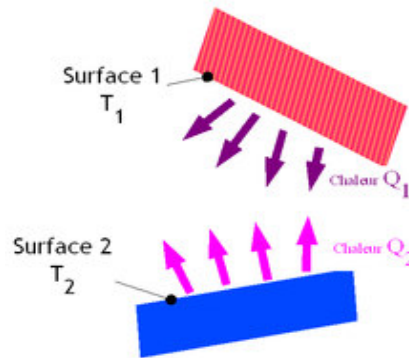


Figure II-2 : représentation schématique du transfert thermique par radiation.

Avec :

- $\sigma$  : constante de Stefan-Boltzmann ( $5.6703 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ).
- $\varepsilon$  : émissivité, indice valant 1 pour un corps noir et qui est compris entre 0 et 1 selon l'état de surface du matériau (sans dimension).
- $T$  : température du corps (K) [6].

## II-3 Eléments de définition du problème thermique

### II-3-1 Couplage des champs électromagnétique et thermique

La source de température donnée par l'équation de la chaleur provient des pertes dans les systèmes (ex. par effet de Joule dans les enroulements ou les pertes fer dans le noyau du transformateur). Si on ne prend pas en compte la dissipation visqueuse de la chaleur donc la puissance induite qui est le résultat du travail des courants induits. Donc le terme source d'électromagnétisme dans l'équation thermique peut s'exprimer comme suit [8]



### II-3-2 champ de température

Les transferts d'énergie thermique sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température ;  $T = f(x, y, z, t)$ . la valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température. Nous distinguerons deux cas :

- Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent.
- Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable.

### II-3-3 Gradient de température

Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite surface isotherme. La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température :

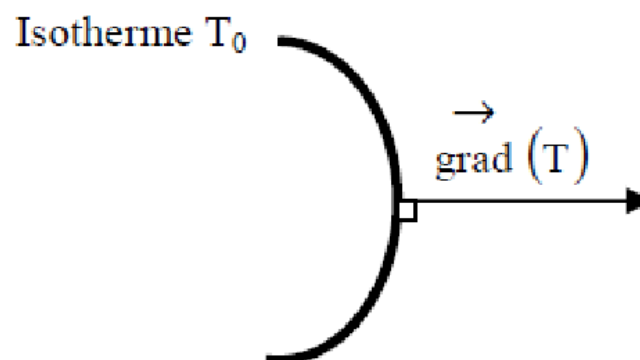


Figure II-3 : Isotherme et gradient thermique

$$\overrightarrow{\text{grad}}(T) = \vec{n} \frac{\partial T}{\partial n}$$

Avec :  $\vec{n}$  vecteur unitaire de la normale

$$\frac{\partial T}{\partial n} \text{ Dérivée de la température le long de la normale}$$

### II-3-4 Flux de chaleur

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur :

$$\varphi = \frac{dQ}{dt}$$

Où S est l'aire de la surface (m<sup>2</sup>).

On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps :

$$\Phi = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt}$$

### II-4 Modélisation thermique

La modélisation thermique des composants est indispensable à l'étude par simulation de ces derniers. En effet, leur simulation permet l'étude des performances thermiques des systèmes tout en préservant leur intégrité. Ce type de modélisation est d'autant plus important, à l'heure actuelle, que les challenges des systèmes électrotechniques tournent autour de l'augmentation des densités de puissance et du fonctionnement dans des environnements sévères, notamment en haute température. Cette problématique se retrouve dans de nombreux domaines d'application tels que le transport, l'aéronautique... etc.

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

II-4-1 Equations de transfert de chaleur par conduction

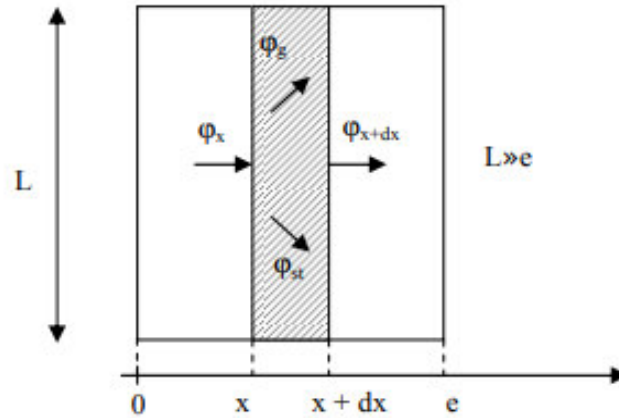


Figure II-4 : Bilan thermique sur un système élémentaire

Considérons un système d'épaisseur dx dans la direction x et de section d'aire S normalement à la direction Ox. Le bilan d'énergie sur ce système s'écrit :

$$\varphi_x + \varphi_g = \varphi_{x+dx} + \varphi_{st}$$

Avec :  $\varphi_x = -\left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}\right)_x$  et  $\varphi_{x+dx} = -\left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x+dx}$

$$\varphi_g = \dot{q} S dx \text{ et } \varphi_{st} = \rho c_p S dx \frac{\partial T}{\partial t}$$

En reportant dans le bilan d'énergie et en divisant par dx, nous obtenons :

$$\frac{(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x})_{x+dx} - (\lambda S \frac{\partial T}{\partial x})_x}{dx} + \dot{q} S = \rho c_p S \frac{\partial T}{\partial t}$$

Soit :  $\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \dot{q} S = \rho c_p S \frac{\partial T}{\partial t}$

Et dans le cas tridimensionnel, nous obtenons l'équation de la chaleur dans le cas le plus général en coordonnées cartésiennes :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

Cette équation peut se simplifier dans un certain nombre de cas :

- a) Si le milieu est isotrope :  $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda$

b) S'il n'y a pas de génération d'énergie à l'intérieur du système :  $\dot{q} = 0$

c) Si le milieu est homogène,  $\lambda$  n'est fonction que de T [6].

Les hypothèses a)+b)+c) permettent d'écrire :

$$\lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{d\lambda}{dT} \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

d) Si de plus  $\lambda$  est constant (écart modéré de température), nous obtenons l'équation de Poisson aux dérivées potentielle.

$$\mathbf{a} \nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial t}$$

le rapport  $a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$  est appelé la diffusivité thermique ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) qui caractérise la vitesse de propagation d'un flux de chaleur à travers un matériau.

e) En régime permanent, nous obtenons l'équation de Laplace

$$\nabla^2 T = 0$$

Par ailleurs, les hypothèses a), c) et d) permettent d'écrire :

- Equation de la chaleur en coordonnées cylindriques :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Dans le cas d'un problème à symétrie cylindrique où la température ne dépend que de r et de t, l'équation qui peut s'écrire sous forme simplifiée :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{q}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}$$

- L'équation de la chaleur devient en coordonnées sphériques :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial^2 (rT)}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{q}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}$$

A cette équation aux dérivées partielles, il faut associer des conditions aux limites géométriques du système qui sont de différents types :

- Condition de types Dirichlet où la température est connue à la frontière considérée.
- Condition de type Neumann où le flux de chaleur est connu.
- Condition de symétrie ou d'antisymétrie.
- Condition de convection à la frontière entre un milieu solide et un fluide.

Dans le cas d'un problème évolutionnaire, une condition initiale sur la valeur de la température est nécessairement associée au problème à résoudre.

### II-4-2 L'équation de chaleur dans un milieu à température uniforme

Dans le cas du transfert de chaleur vers un milieu à température uniforme, ce qui est a priori contradictoire car il est nécessaire qu'il y ait un gradient thermique pour qu'il se produise un transfert de chaleur. Cette approximation du milieu à température uniforme peut néanmoins être justifiée dans certains cas que l'on va préciser. Considérons par exemple la trempe d'une bille métallique qui consiste à immerger une bille initialement à la température  $T_i$  dans un bain à température  $T_0$  maintenue constante. Si l'on suppose que la température à l'intérieur de la bille est uniforme, ce qui sera d'autant plus vrai que sa dimension est petite et sa conductivité thermique élevée, on peut écrire le bilan thermique de cette bille entre deux instants  $t$  et  $t + dt$  : [7].

$$-hS(T-T_0)dt = \rho c_p V \frac{dT}{dt}$$

soit :

$$\frac{dT}{T - T_0} = -hs/\rho c_p V dt$$

D'où :

$$\frac{T - T_0}{T_i - T_0} = \exp\left(-\frac{hs}{\rho c_p V} t\right)$$

On remarque que le groupement  $\rho c_p V / hs$  est homogène à un temps, on l'appellera  $\tau$  la constante de temps du phénomène physique, on a en effet :  $\frac{T-T_0}{T_i-T_0} = \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$  avec :

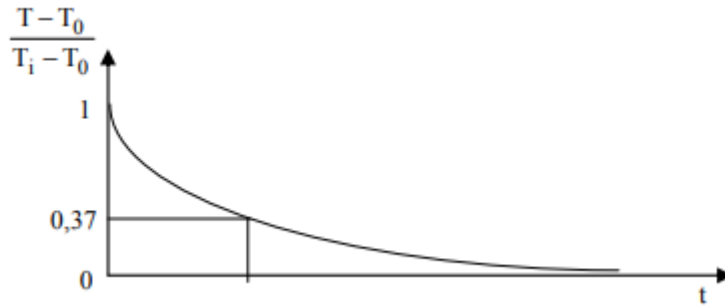


Figure II-5 : Evolution de la température d'un milieu à température uniforme

Il est toujours intéressant en physique de présenter les résultats sous forme adimensionnelle, deux nombres adimensionnels sont particulièrement important en régime variable :

Le nombre de Biot :  $Bi = \frac{\text{Résistance thermique interne}}{\text{Résistance thermique externe}} = \frac{l}{\frac{\lambda}{hS}}$ ,  $l$  est la dimension caractéristique du milieu.

Soit :

$$Bi = \frac{h\ell}{\lambda}$$

L'hypothèse d'uniformité de la température est justifiée lorsque  $Bi < 0,1$ .

Le nombre de Fourier :

$$Fo = \frac{at}{\ell^2}$$

Le nombre de Fourier caractérise la pénétration de la chaleur en régime transitoire. La définition de ces deux nombres permet d'écrire l'expression de la température de la bille sous la forme :

$$\frac{T-T_0}{T_1-T_0} = \exp(-Bi Fo)$$

La connaissance du produit des nombres de Biot et de Fourier permet de déterminer l'évolution de la température de la sphère. On considère généralement qu'un système tel que  $Bi < 0,1$  peut être considéré comme étant à température uniforme, le critère  $Bi < 0,1$  est appelé le critère d'accommodation thermique.

## II-5 Méthodes de résolution des problèmes de thermique

Pour résoudre les équations de transfert thermique trois classes de méthodes sont utilisées :

- Les méthodes analytiques.
- Les méthodes semi numériques.
- Les méthodes numériques.

### II-5-1 Les méthodes analytiques

Les méthodes analytiques donnent la solution exacte au problème thermique sauf que c'est limité aux systèmes de structure géométrique simple et dont les matériaux ont des caractéristiques constantes.

### II-5-3 Les méthodes numériques.

Le calcul des dispositifs thermiques peut se faire par les méthodes numériques suivantes :

- La méthode des différences finis ;
- La méthode des éléments finis ;
- La méthode des équations intégrales de frontières.
- La méthode des volumes finis

L'avantage des méthodes numériques est qu'elles permettent de modéliser les géométries les plus complexes, de tenir compte des caractéristiques non linéaires des matériaux et de la prise en compte de l'évolution des températures dans le temps. L'inconvénient de ce type de méthodes reste le temps de calcul trop long.

### II-5-2 Les méthodes semi-numériques

La méthode des réseaux de résistances thermiques issue de l'analogie thermique-électrique (tableau II.1) et basée sur la discrétisation du système en éléments traversés par des tubes de flux. Sa précision est d'autant plus élevée que le nombre d'éléments est important, au détriment du temps de calcul. Ce type de modèle convient aussi bien aux structures 2D qu'aux structures 3D et permet la prise en compte relative de la complexité de la géométrie.

Thermique		électricité		
Loi de Fourier	$\Delta T = -(L/\lambda S).P$	$\leftrightarrow$	$\Delta V = R.I$	Loi d'Ohm
Conductivité thermique	$\lambda(T)$	$\leftrightarrow$	$\sigma(T)$	conductivité électrique
Température	T	$\leftrightarrow$	V	Potentiel électrique
Puissance thermique	P	$\leftrightarrow$	I	Intensité de courant
Résistance thermique	$L/\lambda S$	$\leftrightarrow$	R	Résistance électrique

Tableau-II-1 : Analogies entre la loi de Fourier et la loi d'Ohm

## II-6 Conclusion

L'étude du fonctionnement de certains systèmes électriques implique une analyse à la fois électromagnétique et les autres phénomènes générés tels que : la thermique, la dynamique...etc [8]. Dans le domaine thermique, les besoins concernent principalement, le calcul de flux de chaleur sur les parois qui délimitent les domaines fluides, et la connaissance des champs de température, car on doit souvent respecter des températures limites pour les matériaux, et parfois aussi pour les fluides de refroidissement. Les équations des bilans thermiques sont bien connues et avec les performances croissantes des moyens informatiques, l'évaluation des échanges de chaleur pour des systèmes à géométries complexes et dont les surfaces ont des propriétés variables devrait être effectuée de plus en plus facilement. Dans de nombreux problèmes de transformation d'énergie thermique, les trois modes de transfert de chaleur coexisteront mais, généralement, au moins une des trois formes pourra être négligée, ce qui simplifiera le traitement mathématique des transferts thermiques. Nous présenterons dans le prochain chapitre le calcul de transfert de chaleur, dans un transformateur, basé sur la méthode des éléments finis en bidimensionnel.



# **Chapitre III**

## **Simulation numérique de transfert thermique dans un transformateur triphasé**

### III-1 Introduction

Pour construire, améliorer ou simplement calculer les performances d'un transformateur, il est nécessaire de connaître les contraintes en termes de température et donc de prédire sa répartition en tout point.

Dans les transformateurs, une fraction de la puissance active reçue à son entrée se dissipe sous forme calorifique, dans le fer par hystérisis et courant de Foucault, dans le cuivre par effet Joule et dans les isolants par pertes diélectriques.

Dans ce chapitre, nous présenterons le transformateur de distribution de fabrication algérienne (Electro-industrie d'AZAZGA) ainsi les résultats de la mise en œuvre informatique du modèle thermique dans l'environnement Matlab/Simulink exploitant le logiciel Finite Element Method Magnetic (FEMM).

Les résultats d'une simulation numérique du modèle thermique de ces transformateurs seront aussi exposés et commentés dont une analyse permettra de montrer l'intérêt de disposer d'un tel outil de calcul pour la conception des matériels d'électrotechnique comme les transformateurs.

### III-2 Présentation du transformateur étudié

Nous nous proposons de calculer la répartition de la température dans un transformateur dont les dimensions et les performances nominales sont décrites ci-après.

#### III-2-1 Les dimensions géométriques

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

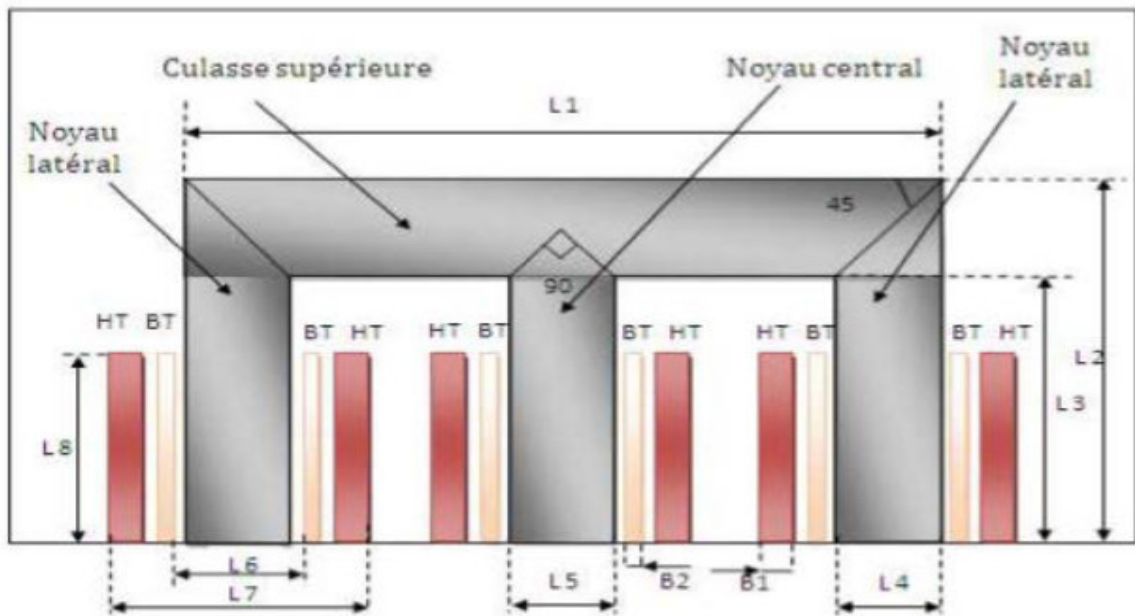


Figure III-1- Configuration géométrique transversal 2D de la moitié du transformateur.

Les dimensions géométriques du transformateur sont données dans le tableau (III-1) .

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

Tableau III-1- Données géométrique du transformateur [12].

### III-2-2 Les propriétés électriques du transformateur

Les données du transformateur sont présentées dans le tableau III-2 suivant :

Caractéristique	Valeurs	Unité
Puissance apparente	630	KVA
Nombre de phase	3	-
Fréquence d'alimentation	50	Hz
Connexion des enroulements primaires	Triangle(D)	-
Connexion des enroulements secondaires	Etoile (Y)	-
Tension nominale au primaire	30	KV
Tension nominale au secondaire	400	V
Courant nominal au primaire	12.12	A
Courant nominale au secondaire	909	A
Nombre de spires au primaire	3000	-
Nombre de spires au secondaire	22	-
Nombre de couche au primaire	14	-
Nombre de couche au secondaire	2	-
Resistance de l'enroulement primaire	17.33	$\Omega$
Résistance de l'enroulement secondaire	$2,71 \cdot 10^{-3}$	$\Omega$
Inductance de l'enroulement primaire	$1.4 \cdot 10^{-3}$	H
Inductance de l'enroulement secondaire	0.154	H

Tableau-III-2- Données électriques du transformateur [12].

### III-3 Simulation du problème thermique :

Le modèle thermique du transformateur défini par les équations de la chaleur (conduction et convection déjà présentés précédemment est à résoudre en association avec les conditions aux limites (à préciser dans le paragraphe qui suit) et la condition initiale à définir dans le cas du problème évolutionnaire. Le modèle thermique du transformateur en 2D est traité par le logiciel d'accès libre Finite Element Method Magnetic (FEMM) basé sur la méthode des éléments finis.

#### III.3.1 Equation à résoudre

Dans les matériaux solides du transformateurs, l'équation de la conduction en bidimensionnel (2D) est donnée par :

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

Dans le cas traité ici, les conductivités thermiques sont prises égales dans les deux directions et indépendantes dès la température  $\lambda_x = \lambda_y = \lambda$ . Ceci, simplifie l'équation à résoudre qui devient :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = -\dot{q}/\lambda$$

Les différents matériaux utilisés dans le transformateur et leurs propriétés sont donnés dans le tableau-III-3-

Matériaux	Caractéristique
	$\lambda$ Conductivité thermique (W/m.K°)
Air	0.0181
Fer (Iron Pure)	83
fibres de verre (Glass fiber)	0.08
Fil de cuivre HT	400
Fil de cuivre BT	400

Tableau-III-3- Matériaux utilisés dans le transformateur [12] .

A cette équation aux dérivées partielles, il est nécessaire d'associer des conditions aux limites physiques du transformateur pour que la solution à cette équation soit unique.

### III-3-2 Conditions aux limites :

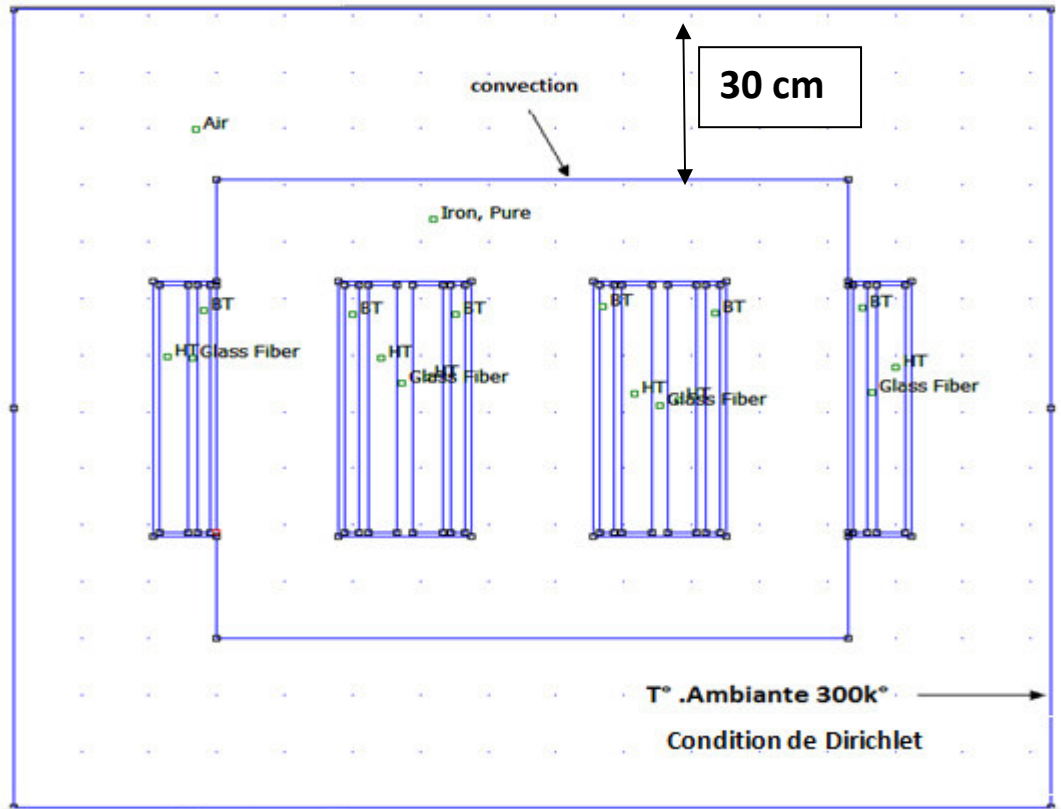


Figure-III-2 : Conditions aux limites sur le transformateur.

Une étape indispensable pour la résolution de ce problème consiste à définir les conditions aux limites géométriques. Ceci permet d'obtenir une solution unique.

- Une condition de type Dirichlet : La température ambiante constante  $T=300K^{\circ}$  sur le contour extérieur de l'air entourant le transformateur (la surface étant choisie suffisamment loin du transformateur pour ne pas subir l'influence de son échauffement mais pas trop loin pour limiter le domaine d'étude au strict espace nécessaire).

- Une condition dite de convection sur la surface externe du transformateur ce qui permet de définir le coefficient de convection pour l'air externe  $h=30$  à  $150$  ( $W/m^2K^{\circ}$ ) (entre l'écoulement laminaire et turbulent). La méthode de détermination de ce coefficient dépasse le cadre de ce travail.

**III-3-3 Organigramme de calcul :**

Le programme informatique que nous avons élaboré pour l'étude du transformateur peut être schématisé par l'organigramme ci-dessous :

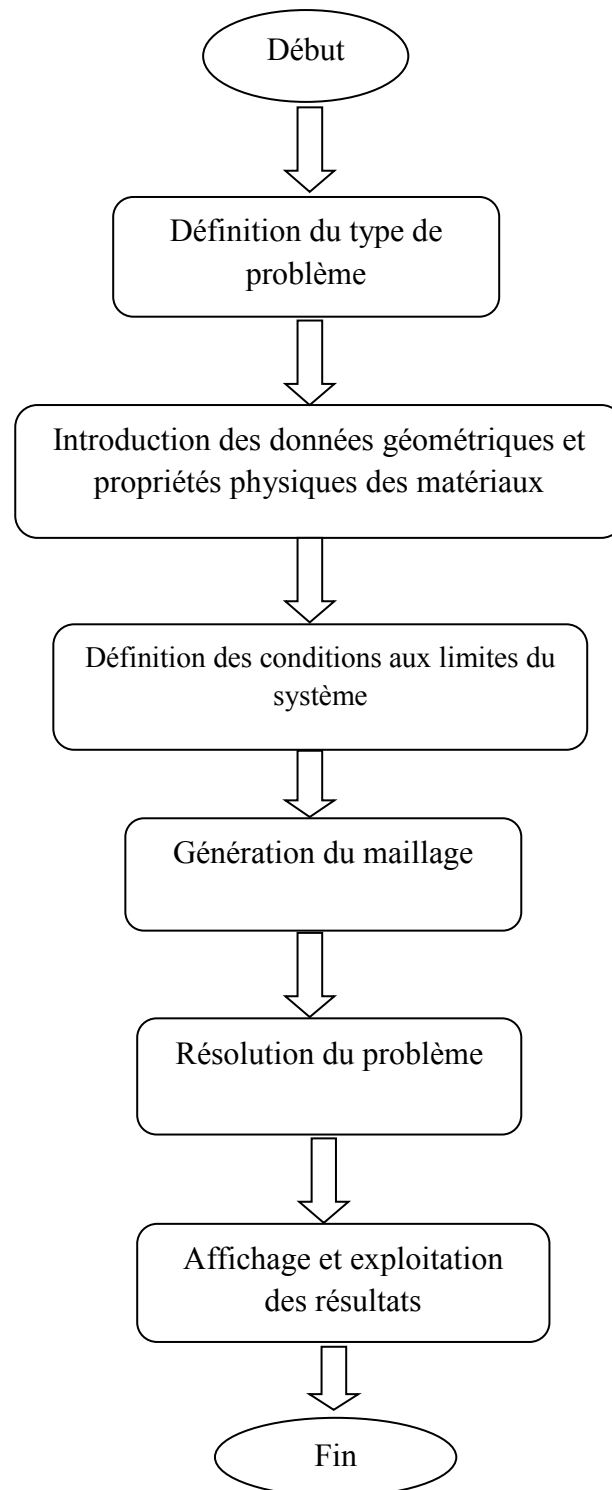


Figure-III-3- Organigramme de calcul utilisant la méthode des éléments finis

### III-3-4 Maillage en éléments finis du transformateur :

Le logiciel femm résout les problèmes après une discrétisation du domaine d'étude. Ce maillage est constitué de triangles aussi petits que possible et qui permet d'approximer au mieux possible la structure géométrique du système étudié. Plus le nombre d'éléments et de nœuds est élevé plus on s'approche de la solution exacte du problème mais le temps de calcul sera d'autant plus grand aussi. Une étude peut se faire pour le choix des dimensions des éléments finis selon la variation de la température dans les différentes zones du transformateur.

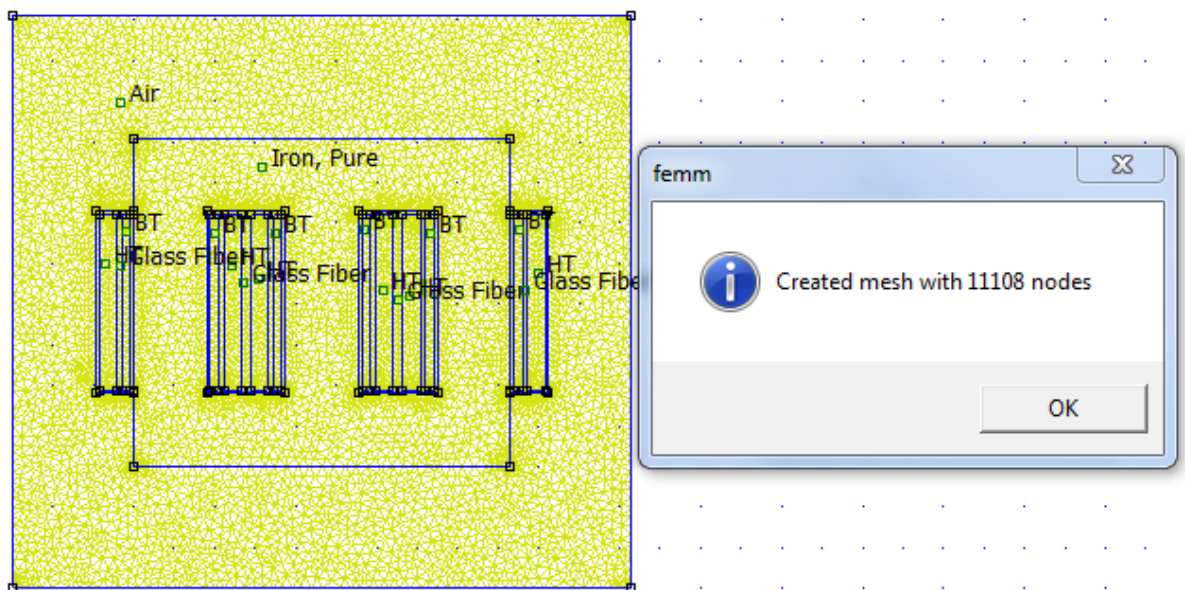


Figure-III-4-Maillage en éléments finis du système 2D du transformateur.

## III-4 Etude du comportement thermique du transformateur en régime permanent

### III-4-1 Effets des pertes sur la répartition de la température dans le transformateur

**1<sup>er</sup> cas :** Prise en compte des pertes Joule seules.

Dans les deux bobines (HT et BT), on considère les pertes Joule et on néglige les pertes fer ( $P_{\text{fer}}=0$ ) dans le noyau du transformateur.



**Détermination des pertes volumique :**

La source de l'échauffement dans les transformateurs est essentiellement constituée des pertes Joule surtout dans le cas du point de fonctionnement nominal.

**Dans la bobine BT :**

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

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

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

Avec :  $S_{BT}=0.008938$  m<sup>2</sup>

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

$$P_{V1} = 95007.065 \text{ w/m}^3$$

**Dans la bobine HT:**

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

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

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

Avec:  $S_{HT}=0.018748$  m<sup>2</sup>

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

$$P_{V2} = \frac{17.33 \cdot 12.12^2}{0.052794} \quad P_{v2} = 48219.11 \text{ w/m}^3$$

La figure III-5 montre la répartition de la température dans le transformateur au point de fonctionnement nominal sans tenir compte des pertes fer. Nous remarquons un échauffement excessif dans les bobines siège des pertes Joule.

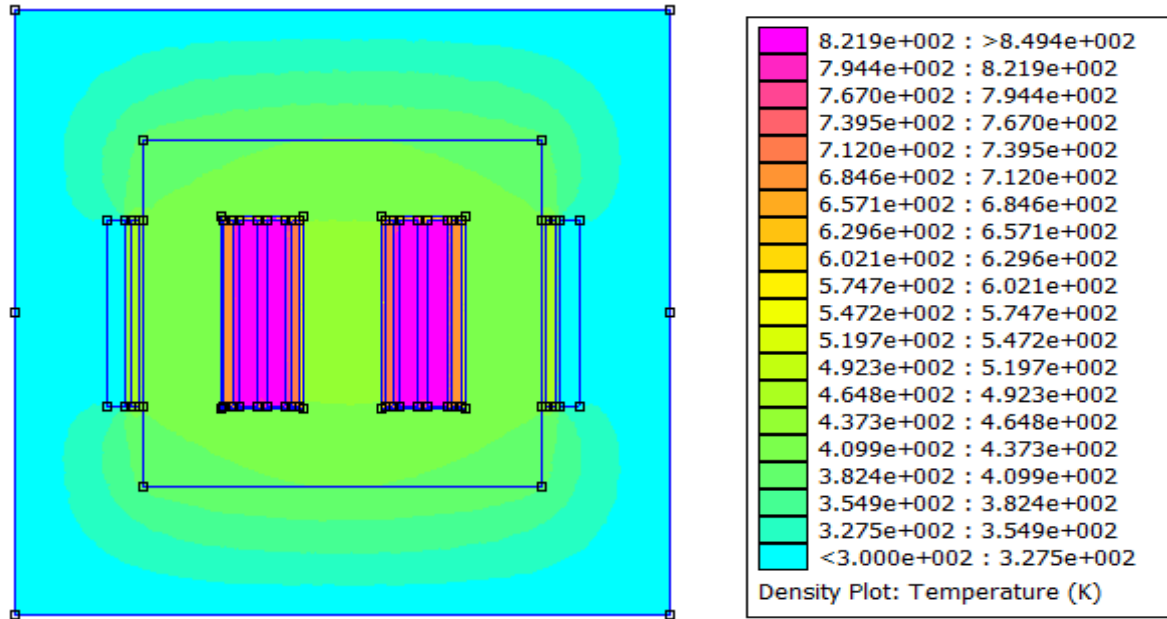


Figure-III-5- Répartition de température dans le transformateur sans pertes fer.

**2<sup>ème</sup> cas :** Prise en compte des pertes Joule et des pertes fer conjointement.

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

Calcul des pertes fer pour une induction :  $B = B_m = 2T$ .

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

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

On a:

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

Les coefficients des pertes par hystérésis et courants de Foucault ont été tirés de la littérature spécialisée [10].

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

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

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

$$P_{cf} = k_{cf}.B^2.f^2$$

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

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

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

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

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

La figure III-6 montre une nouvelle répartition de la température qui montre que la température dans le noyau de fer subit une élévation comparativement au cas sans pertes fer.

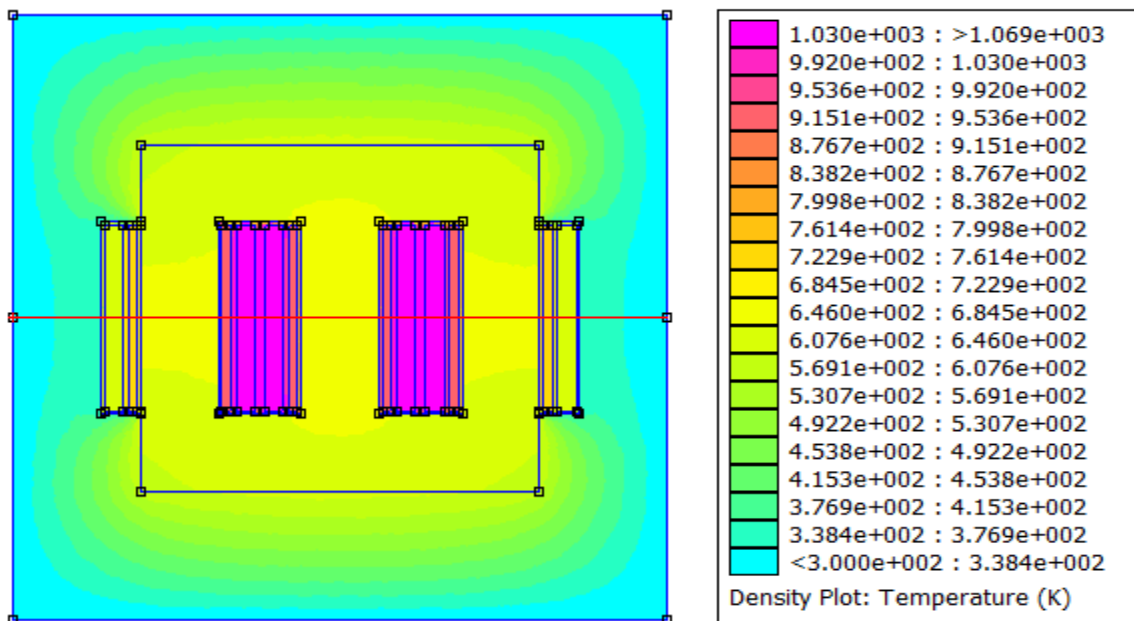


Figure-III-6- Répartition de température dans le transformateur avec en compte des pertes fer.

La figure III-7 montre clairement l'influence de la prise en compte des pertes fer sur l'échauffement des différentes parties du transformateur.

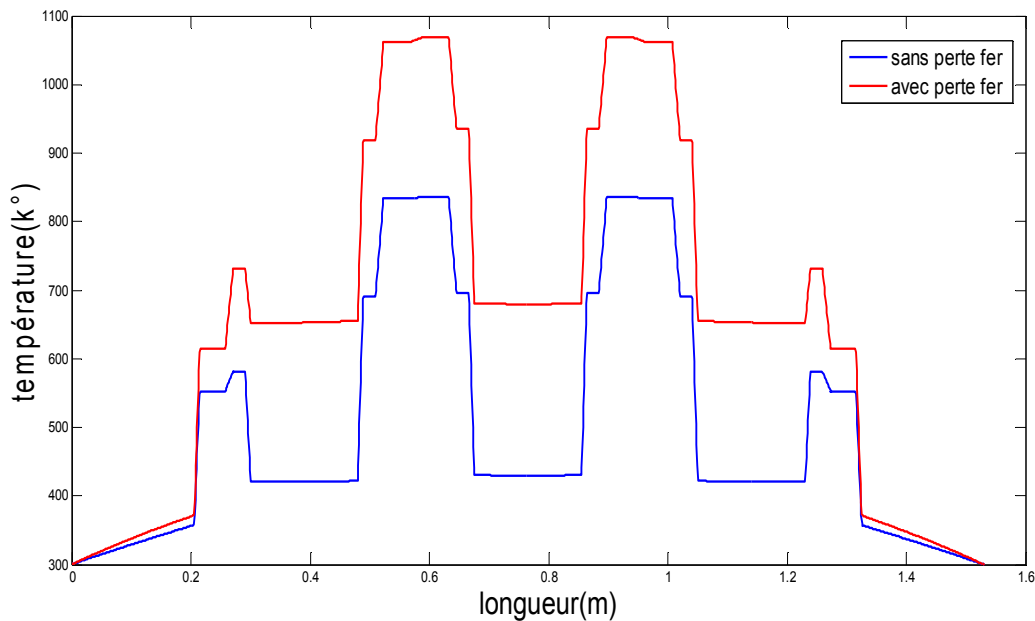


Figure-III-7- courbe de la variation de température dans différentes zones de transformateur le long de la ligne soulignée en rouge des figures (-III-5-) et (-III-6-).

### III-4-2 Effets de la variation de l'épaisseur des isolants sur la répartition de la température dans le transformateur :

Afin de trouver un rapport entre la variation de l'épaisseur de l'isolant (glass fibre) et la température au niveau des bobines HT et BT, sans apporter un changement aux pertes joules et pertes fer calculées précédemment, on a effectué trois calculs où on a varié l'épaisseur ( $d$ ) de l'isolant.

#### Calcul 1 : Epaisseur de l'isolant $d= 0.009$ m

La figure III-8 montre la variation de la température dans le transformateur dans le cas d'une épaisseur d'isolant  $d=0.009$ m et pour des pertes constantes.

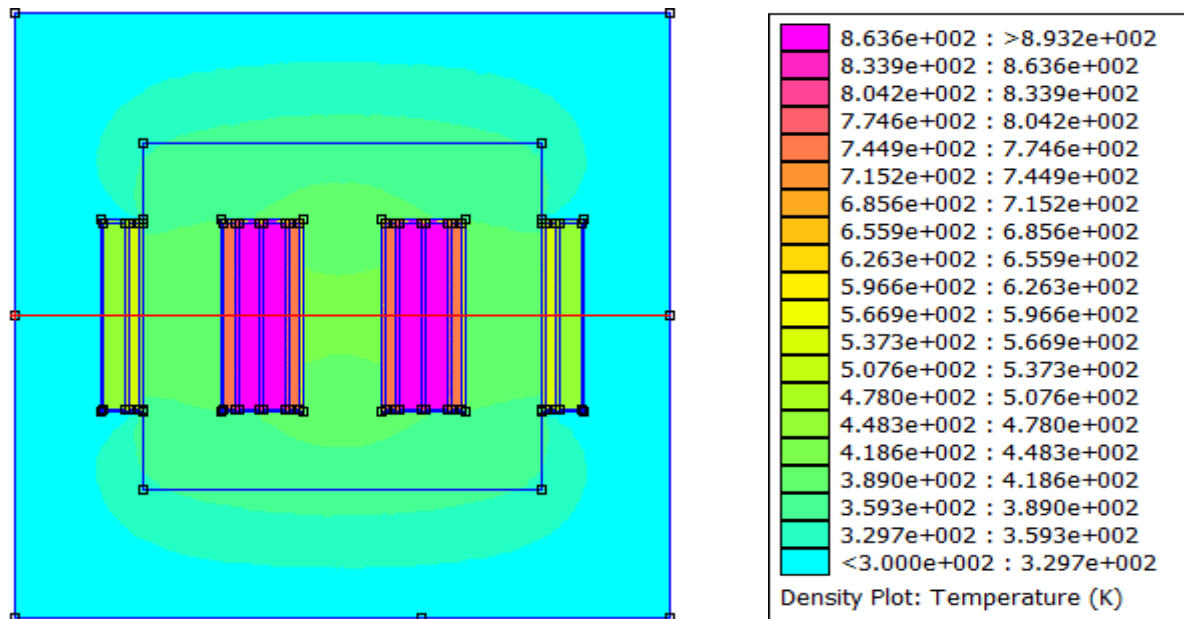


Figure-III-8- Répartition de température dans le transformateur  $d=0.009$  m

**Calcul 2 : Epaisseur de l'isolant  $d=0.007$  m**

La figure III-9 montre l'évolution de la température dans le transformateur dans le cas d'une épaisseur d'isolant  $d=0.007$ m et pour des pertes constantes.

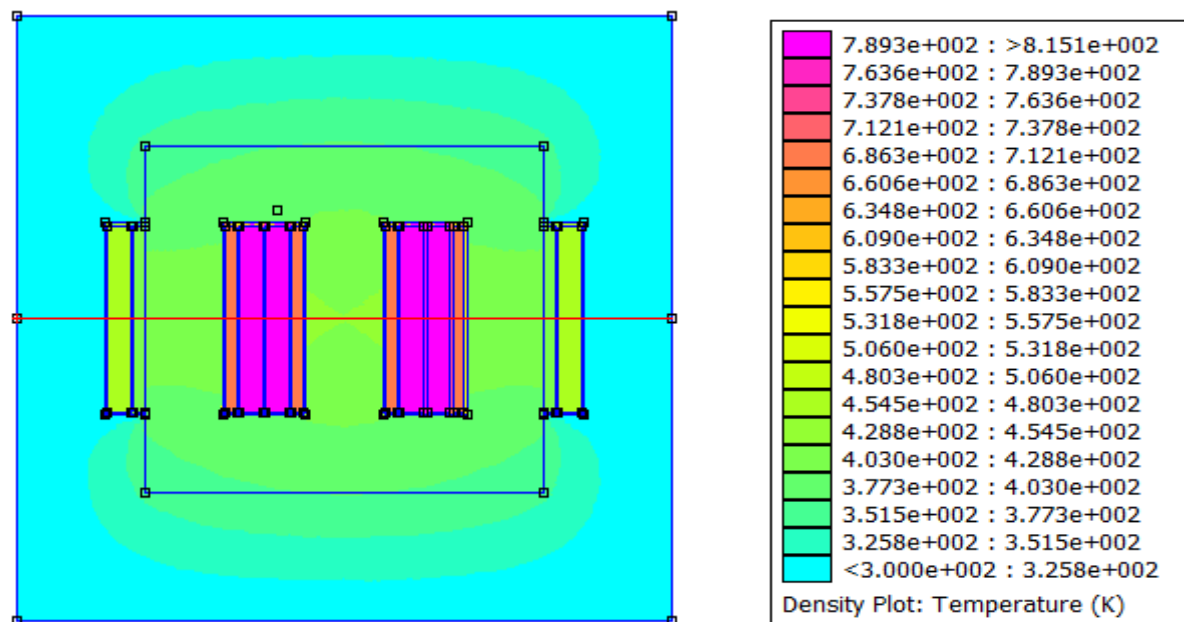


Figure-III-9- Répartition de température dans le transformateur  $d=0.007$  m

**Calcul 3 : Epaisseur de l'isolant  $d=0.005$  m**

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

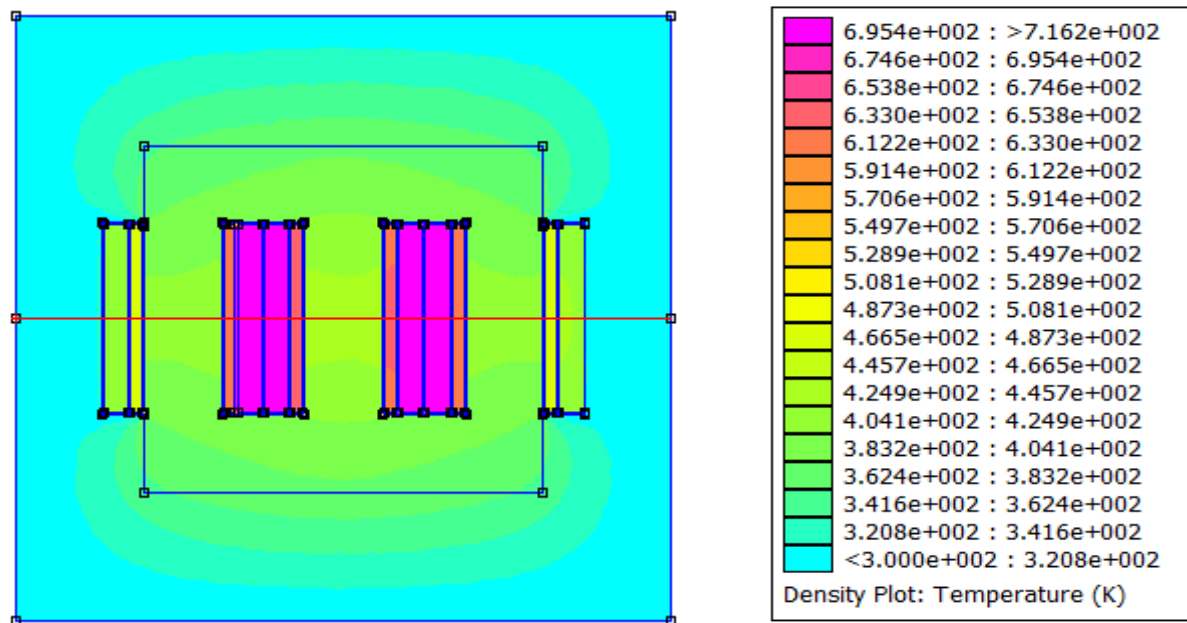


Figure-III-10- Répartition de température dans le transformateur  $d=0.005\text{ m}$

On constate sur la figure III-11 que la variation de l'épaisseur de l'isolant a une influence remarquable sur la température au niveau des bobines HT et BT donc au niveau du transformateur. La diminution de l'épaisseur de l'isolant provoque l'abaissement de la température au niveau des bobines et donc son accroissement dans les régions entourant le cuivre, à savoir l'isolant et au-delà le noyau de fer.

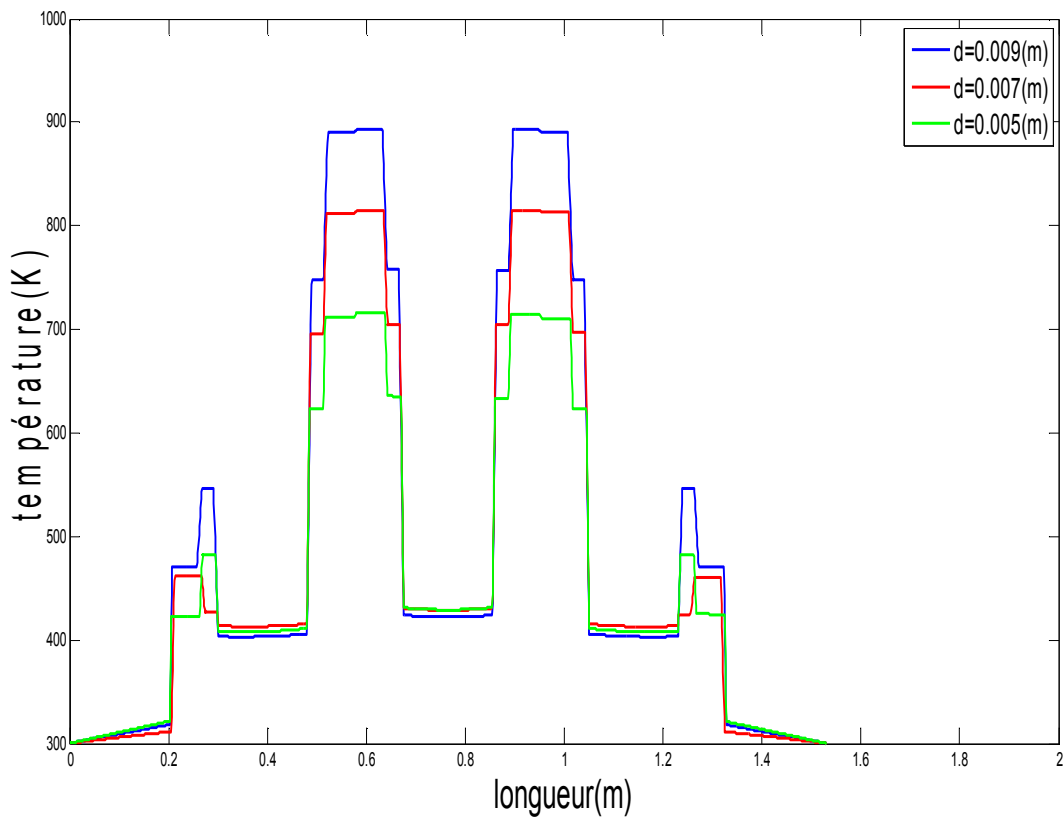


Figure-III-11- courbe de la variation de température dans différentes zones du transformateur le long de la ligne rouge des figures (-III-8-) et (-III-9-) et (-III-10-).

### III-4-3 Effet combiné de la variation de l'épaisseur de l'isolant et des pertes volumiques sur la répartition de la température dans le transformateur

- On prend le cas du point nominal avec des pertes fer et des pertes Joule.
- On calcule les nouvelles pertes Joule volumique au niveau des bobines (HT et BT) selon les nouvelles valeurs des volumes des deux bobines donc de nouvelles résistances.

#### Premier calcul :

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

#### Détermination des pertes volumiques :

##### 1- La bobine BT :

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

2- La bobine HT :

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

Bobines	Nouvelles valeurs des pertes ( $\text{w/m}^3$ )
BT	80657.92465
HT	41064.28644

Tableau-III-4-les nouvelles valeurs des pertes au niveau des bobines HT et BT .

La figure III.12 montre la répartition de la température dans le transformateur pour l'épaisseur de l'isolant  $d=0.009\text{m}$  et les pertes Joule déterminées en tenant compte de la variation de la section des bobines.

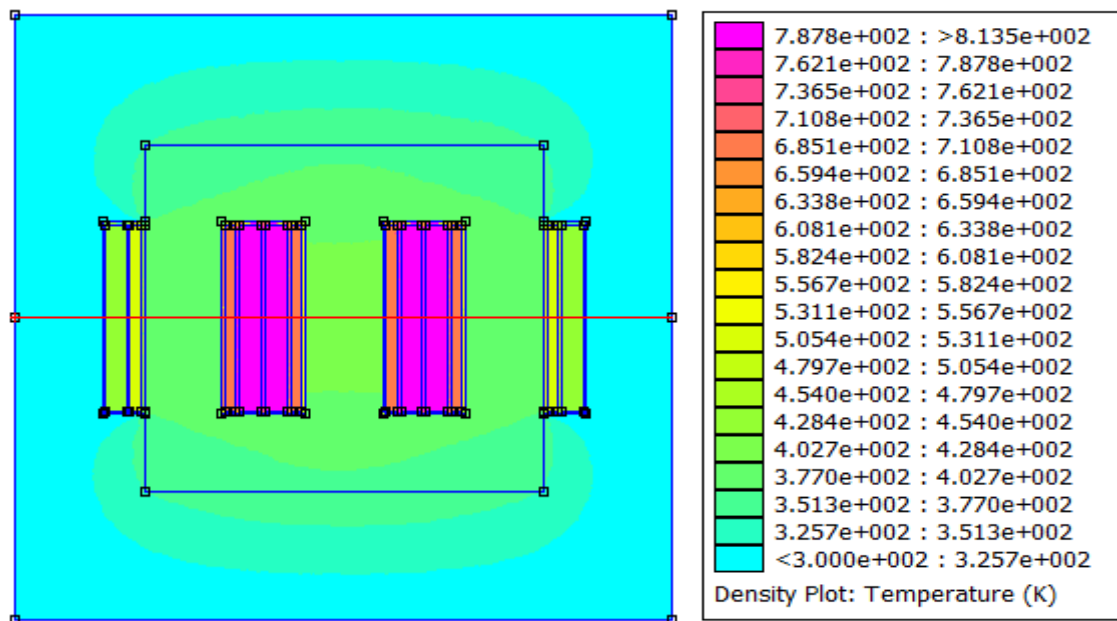


Figure III-12- Répartition de température dans le transformateur  $d=0.009\text{m}$  avec des pertes variables

2<sup>ème</sup> calcul :

Transformateur avec :  $h_{(\text{convections})}=150 \text{ (W/m}^2\text{K}^\circ)$ , épaisseur de l'isolant  $d=0.007\text{m}$



Détermination des pertes volumiques :

1- La bobine BT :

On a:  $h_1 = 1.1$  m,  $L = 0.436$  m,  $l = 0.0258$  m,  $I_{BT} = 909$  A,  $R_{BT} = 2.71 \times 10^{-3} \Omega$

La bobine HT :

On a:  $L = 0.436$  m,  $l = 0.0541$  m,  $I_{HT} = 12.12$  A,  $R_{HT} = 17,33 \Omega$

Bobines	Les nouvelles valeurs des pertes (w/m <sup>3</sup> )
BT	75781.61467
HT	38415.53359

Tableau-III-5-les nouvelles valeurs des pertes au niveau des bobines HT et BT.

La figure III.13 montre la répartition de la température dans le transformateur pour l'épaisseur de l'isolant  $d=0.007$ m et les pertes Joule déterminées avec les nouvelles sections des bobines.

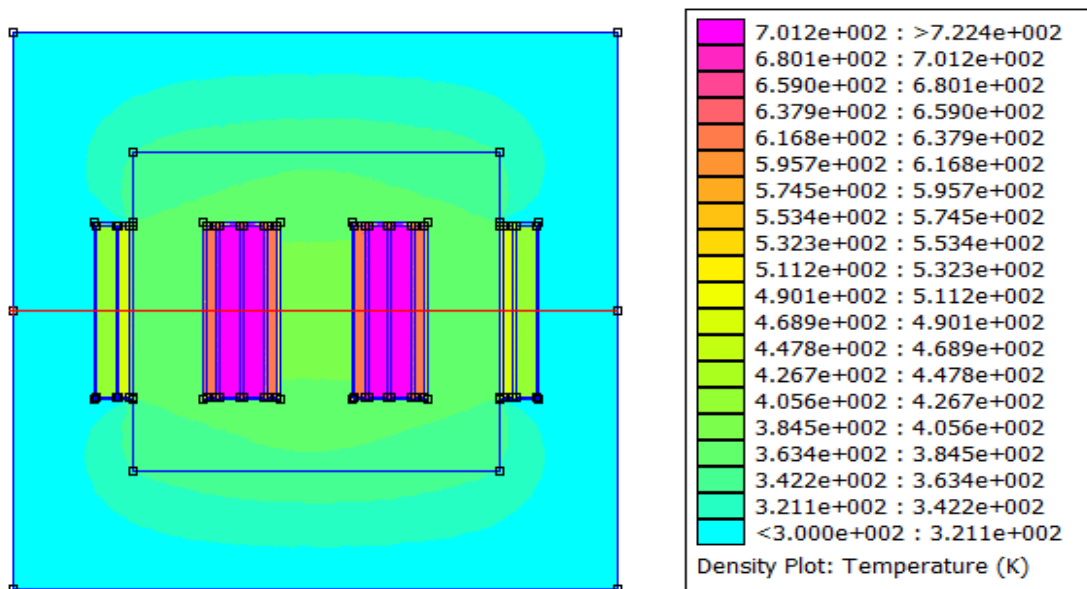


Figure III-13- Répartition de température dans le transformateur  $d=0.007$ m avec des pertes variables

**3<sup>ème</sup> calcul :**

Transformateur avec :  $h_{(convections)}=150$ , épaisseur de l'isolant  $d=0.005m$

**Détermination des pertes volumiques :**

**2- La bobine BT :**

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

**1- La bobine HT :**

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

Bobines	Les nouvelles valeurs (w/m <sup>3</sup> )
BT	69971.58585
HT	35682.19226

Tableau-III-6-les nouvelles valeurs des pertes au niveau des bobines HT et BT.

La figure III.14 montre la répartition de la température dans le transformateur pour l'épaisseur de l'isolant  $d=0.005m$  et les pertes Joule déterminées avec le changement des sections des bobines.

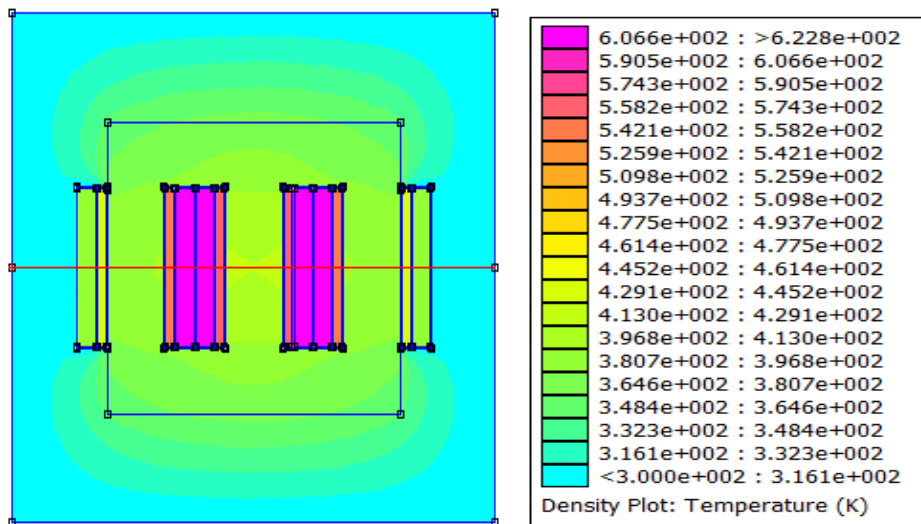


Figure III-14- Répartition de température dans le transformateur  $d=0.005m$  avec des pertes variables

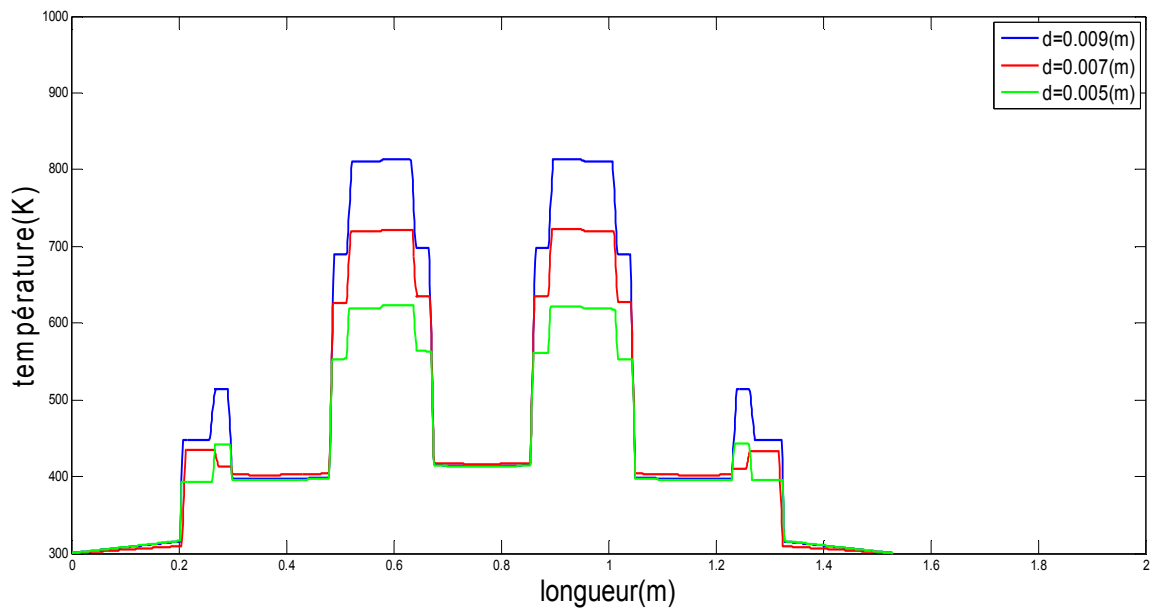


Figure-III-15- Courbes de la variation de la température le long de la ligne soulignée en rouge sur les figure (-III-12-) et (-III-13-) et (-III-14-)

Nous avons effectué trois calculs pour différentes épaisseurs de l'isolant de fibre de verre ( $d=0.009\text{ m}$ ,  $d=0.007\text{ m}$  et  $d=0.005\text{ m}$ ) tout en conservant les dimensions du noyau de fer invariables et donc avec une augmentation du volume des bobines HT et BT autrement dit les pertes Joules volumiques vont diminuer par rapport au premier cas. Les résultats obtenus montrent qu'il y a un rapport entre la température au niveau des bobines et l'épaisseur de l'isolant. On remarque qu'à chaque fois que l'épaisseur de l'isolant diminue la température au niveau des bobines diminue. On constate, aussi, que la diminution des pertes volumiques amène une diminution de la température dans toutes les régions du transformateur.

#### III-4-4 Variation des pertes et son impact sur la température du transformateur.

Dans le tableau II-7 on a introduit les valeurs de la température moyenne de chaque matériau en fonction des pertes, ce qui nous permettra de faire ressortir l'influence de la diminution des pertes volumique sur l'état de l'échauffement dans toutes les zones du transformateur.

**Premier cas :  $d=0.009$  m (voir tableau II-7)**

Paramètre	La bobine HT	La bobine BT	Iron., Pure	Glassb Fibre	Air
Température moyenne avec pertes	750.992K	683.303 K	389.519 K	631.131 K	322.219K
Température moyenne avec pertes modifiées $d=0.009$	690.023 K	633.418 K	384.183 K	588.757 K	320.831 K

Tableau-III-7- les valeurs de la température moyenne de chaque zone dans le transformateur.

**Deuxième cas :  $d=0.007$  m (voir tableau III-8)**

Paramètre	La bobine HT	La bobine BT	Iron., Pure	Glass Fibre	Air
Température moyenne avec perte constante $d=0.007$	695.775 K	608.305 K	396.125 K	592.669 K	323.181 K
Température moyenne avec perte modifier $d=0.007$	624.881 K	557.369 K	387.418 K	543.132 K	321.093 K

Tableau-III-8- les valeurs de la température moyenne de chaque zone dans le transformateur.

**Troisième cas : d=0.005 m (voir tableau III-9)**

Paramètre	La bobine HT ( $W/m^3$ )	La bobine BT ( $W/m^3$ )	Iron., Pure	Glass Fibre	Air
Température moyenne avec perte constante d=0.005	616.264 K	579.514 K	394.078 K	545.488 K	323.612 K
Température moyenne avec perte modifiée d=0.005	544.668 K	519.372 K	383.4K	493.644 K	320.81 K

Tableau-III-9- les valeurs de la température moyenne de chaque zone dans le transformateur.

Nous pouvons faire les constatations suivantes :

➤ Plus l'épaisseur de l'isolant diminue plus la température moyenne des différents matériaux constituant le transformateur diminue.

➤ Plus les pertes Joule diminuent plus la température moyenne des différentes régions du transformateur diminue ceci d'une façon plus prononcée au niveau des bobines par rapport aux autres matériaux (noyau de fer et isolant)

**III-5 Etude du comportement thermique transitoire du transformateur.****III-5-1 Equation à résoudre**

Le mode de transfert de chaleur dominant dans le transformateur reste la conduction dans le noyau de fer, les bobines de cuivre et l'isolant en fibre de verre. L'équation en 2D de la conduction est donnée dans le chapitre II que nous reproduisant ci-après :

$$\lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

Cette équation est à résoudre comme dans le cas permanent (température indépendante du temps) avec le logiciel FEMM basé sur la MEF, sauf qu'il faudra échantillonner le temps pour

résoudre pas à pas cette équation de qui donne une équation discrète dans le temps mais après le maillage de l'espace géométrique du transformateur, nous obtiendrons un système d'équations algébriques à résoudre. L'équation discrète dans le temps est de la forme :

$$\lambda \left( \frac{\partial^2 T^{(k)}}{\partial x^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 T^{(k)}}{\partial y^2} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\Delta T}{\Delta t} = \rho c_p \frac{(T^{(k)} - T^{(k-1)})}{(t_k - t_{k-1})}$$

Où  $T^{(k)}$  et  $T^{(k-1)}$  sont les températures aux instants  $t_k$  et  $t_{k-1}$  respectivement.

Cette équation nécessite des conditions aux limites physiques du transformateur mais aussi une condition initiale définissant la température à tous les nœuds du domaine discrétisé à l'instant de départ défini par  $k=1$  donnant  $t_0$ . Il suffira d'incrémenter le temps de  $\Delta t$  à chaque itération et de calculer les températures à tous les nœuds du maillage en résolvant le système d'équation algébriques correspondant.

### III-5-2 Conditions aux limites

Les mêmes conditions définies dans le cas du régime permanent restent valables à chaque itération dans le cas présent. Une condition de température constante égale à la température ambiante suffisamment loin du transformateur. Et une condition de convection pour tenir compte du mode de transfert de chaleur entre les matériaux solides et l'air environnant ou celui utilisé pour le refroidissement du transformateur.

### III.5.3 Condition initiale

La condition initiale utilisée ici est triviale. Nous choisissons une température égale à la température de l'air ambiant à tous les nœuds du transformateur à l'instant initial de son alimentation.

## III-5-4 Organigramme

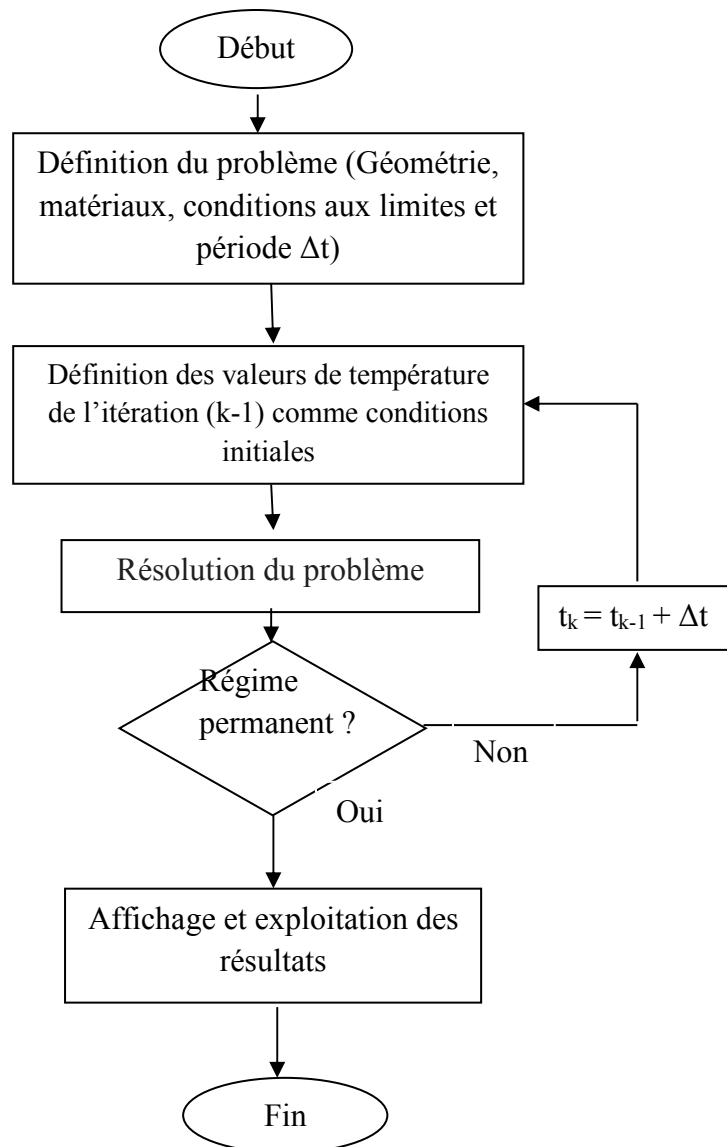


Figure-III-16- Organigramme de calcul pour le régime évolutif.

## III-5-5 Evolution de la température en fonction du temps dans le transformateur étudié

## III-5-5-1 Cas d'un transformateur avec des pertes constantes

Nous supposons que les pertes Joule volumiques ainsi que les pertes fer volumiques sont considérées constantes et égales aux valeurs utilisées au point nominal défini précédemment pour le cas permanent.

Après avoir effectué plusieurs simulations préliminaires avec notre programme écrit dans l'environnement Matlab/Simulink, on arrive à une valeur de  $t=90000$  secondes pour atteindre le régime permanent (voir figure III-17)

La figure III-17 montre l'évolution de la température dans chaque matériau (les bobines HT et BT, le noyau de fer, l'air, l'isolant de fibre de verre) en partant du point initial, passant par un régime transitoire pour atteindre un régime permanent.

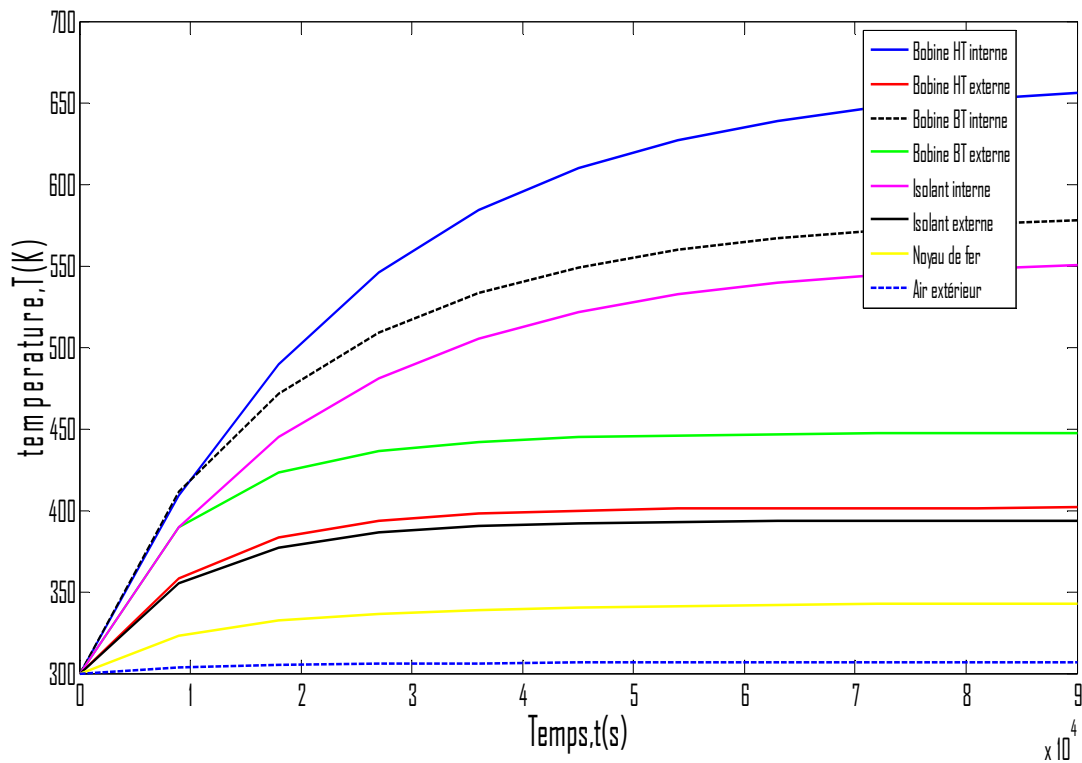


Figure III-17- l'évolution de la température en fonction du temps

Pour voir de plus près ces variations, nous présentons nos résultats dans le tableau ci-dessous (voir tableau III-10)



Temps final =90000 secondes

Temps (s)	Bobine HT Interne	Bobine HT Externe	Bobine BT Interne	Bobine BT Externe	Isolant Interne	Isolant Externe	Noyau de Fer	Air Extérieur
0	300	300	300	300	300	300	300	300
900	409	358	411	389	389	355	323	304
10000	490	383	472	423	445	377	332	305
20000	545	394	509	436	481	386	337	306
30000	584	398	533	442	505	390	339	306
40000	610	400	549	445	521	392	340	306
50000	627	401	560	446	532	393	341	307
60000	639	401	567	447	540	393	342	307
70000	647	401	572	447	544	393	342	307
80000	652	402	575	447	548	394	343	307
90000	656	402	577	447	550	394	343	307

Tableau-III-10- Evolution de la température en fonction du temps.

- On remarque que les températures au niveau des bobines (HT, BT) internes sont plus élevées par rapport à celles des bobines (HT, BT) externes respectivement. De même pour l'isolant interne par rapport à l'isolant externe.

- La raison est tout à fait prévisible, l'air environnant extérieur contribue à refroidir considérablement les solides adjacents par contre les éléments internes ont une température qui est comme piégée.

### III-5-5-2 Cas des pertes Joule volumiques variables

Les pertes Joule sont dépendantes de la température car elles dépendent des résistances qui elles même augmentent avec l'augmentation de la température dans le transformateur.

Le relations donnant les résistances  $R_{HT}$  et  $R_{BT}$  des bobines du transformateur sont.

$$R_1 = R_{BT} (1 + \alpha(T - T_{ref})) \quad ; \quad R_2 = R_{HT} (1 + \alpha(T - T_{ref}))$$

( $\alpha$ ) Coefficient de température du cuivre =  $3.93 \cdot 10^{-3} \cdot K^{-1}$  à la température de référence  $T_{ref}$

#### Détermination des pertes volumiques

##### Dans la bobine BT

On a  $h_1 = 1.1$  m,  $L = 0.44$  m,  $l = 0.0276$  m,  $I_{BT} = 909$  A,  $R_{BT} = 5.905 \cdot 10^{-3} \Omega$

$$V_{BT} = 2 \cdot (0.2176 + 1.1) \cdot S_{BT}$$

$$S_{BT} = 0.012144 \text{ m}^2.$$

$$V_{BT} = 0.0320018688 \text{ m}^3.$$

$$P_{V1} = \frac{5.905 \cdot 10^{-3} \cdot 909^2}{0.0320018688}$$

$$P_{V1} = 152465.7656 \text{ W/m}^3$$

##### \$Dans la bobine HT:

On a:  $L = 0.44$  m,  $l = 0.0574$  m,  $I_{HT} = 12.12$  A,  $R_{HT} = 37.76207 \Omega$

$$V_{HT} = 2 \cdot (0.3124 + 1.1) \cdot S_{HT}$$

$$S_{HT} = 0.025256 \text{ m}^2$$

$$V_{HT} = 0.713431488 \text{ m}^3$$

$$P_{V2} = \frac{37.76207 \cdot 12.12^2}{0.071341488}$$

$$P_{V2} = 77751.49694 \text{ W/m}^3$$

La figure III-18 Montre l'évolution de la température dans chaque matériau (HT, BT, Iron, Pure, Air, Glass Fibre) en fonction du temps avec une prise en compte de la variation des pertes Joule volumique en fonction de la température.

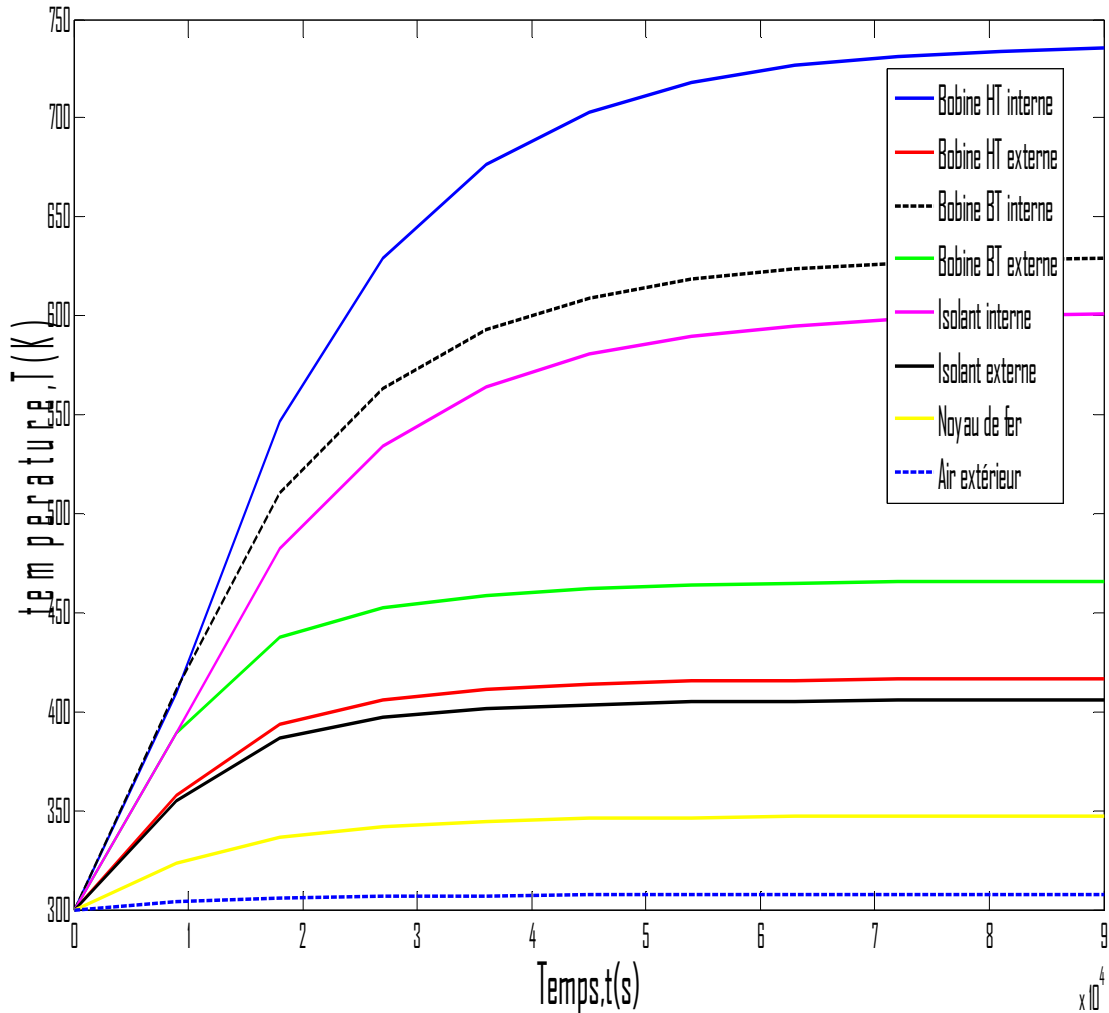


Figure III-18- Evolution de la température en fonction du temps avec des pertes Joule variables.

- Pour mettre en évidence l'évolution de la température, nous présentons ces résultats chiffrés dans le tableau ci-dessous (voir tableau III-11).

Temps (S)	Bobine HT Interne	Bobine HT Externe	Bobine BT Interne	Bobine BT Externe	Isolant Interne	Isolant Externe	Noyau de Fer	Air Extérieur
0	300	300	300	300	300	300	300	300
900	409	358	411	389	389	355	323	304
10000	547	394	510	437	482	387	337	306
20000	629	406	563	452	534	397	342	307
30000	676	411	593	459	564	401	344	307
40000	703	414	609	462	581	403	346	307
50000	718	415	619	464	590	405	347	307
60000	726	416	624	465	595	405	347	307
70000	731	416	627	465	598	406	347	307
80000	734	417	628	466	600	406	347	307
90000	735	417	629	466	601	406	347	307

Tableau-III-11 - Les différentes valeurs de l'évolution de la température en fonction du temps.

- Les montées en température semblent équivalentes durant la première période, puis le temps passant et les pertes Joule augmentant donnent des températures qui s'écartent nettement de celles calculées dans variation des pertes.

- Tout accroissement des pertes Joule volumiques donne une augmentation significative de la température des bobines (HT et BT) interne et de l'isolant interne par rapport à celles des matériaux externes.

Figure III-19- montre l'évolution des pertes Joule volumiques dans les deux bobines (HT et BT) en fonction du temps.

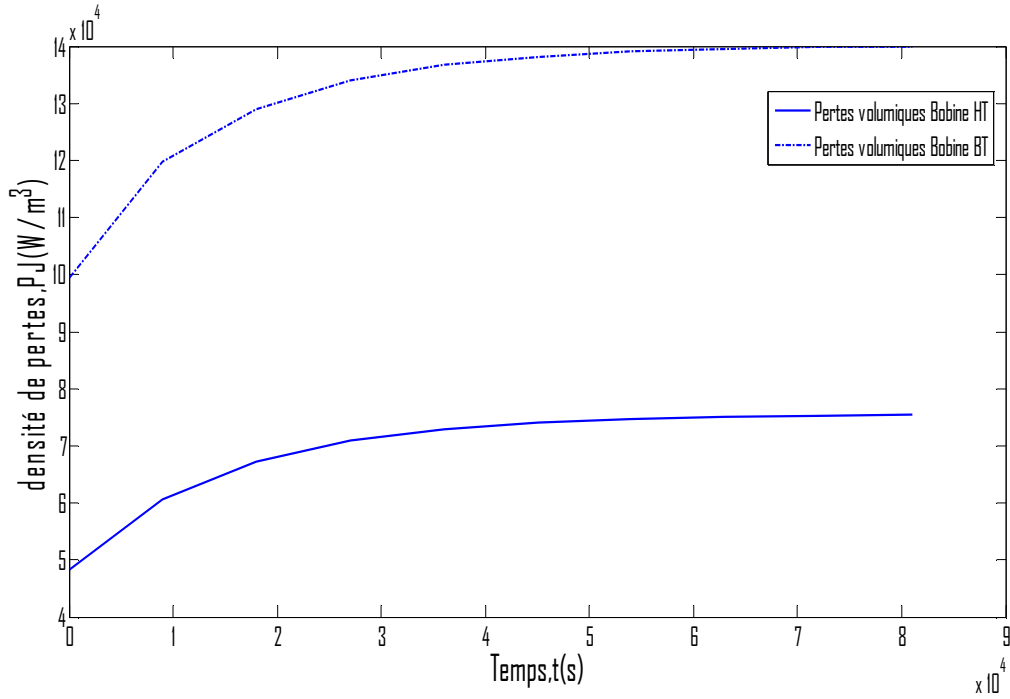


Figure –III-19- Densité des pertes Joule volumiques en fonction du temps

La figure III-20- montre la courbe de la résistance  $R_{HT}$  en fonction de la température donc du temps.

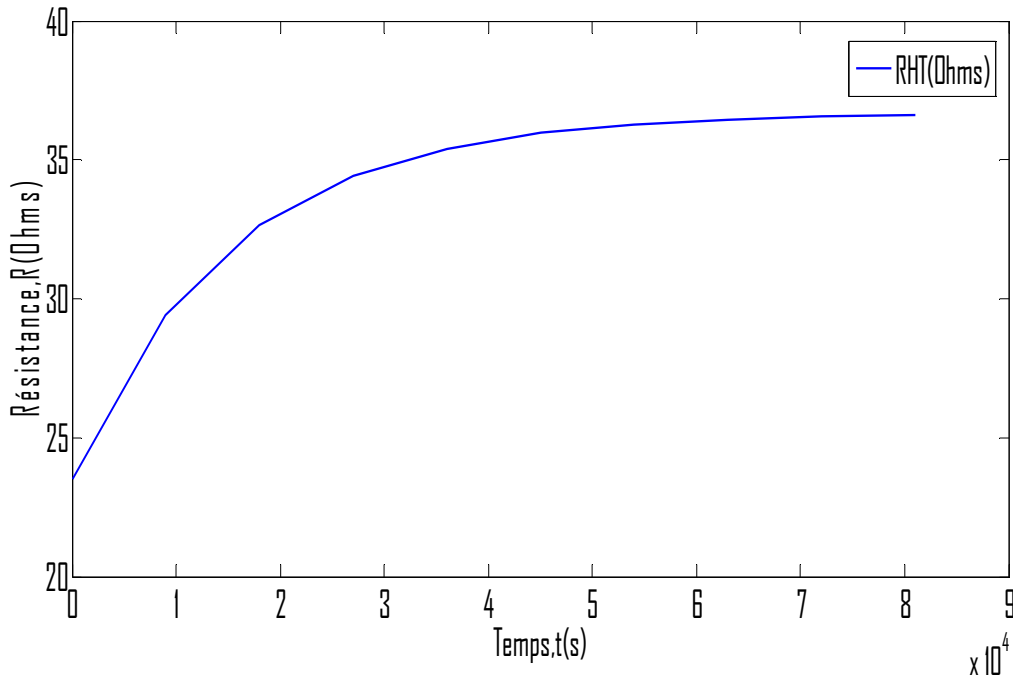


Figure III-20- résistance  $R_{HT}$  en fonction du temps

La figure III-21- montre la courbe de la résistance  $R_{BT}$  en fonction de la température donc du temps.

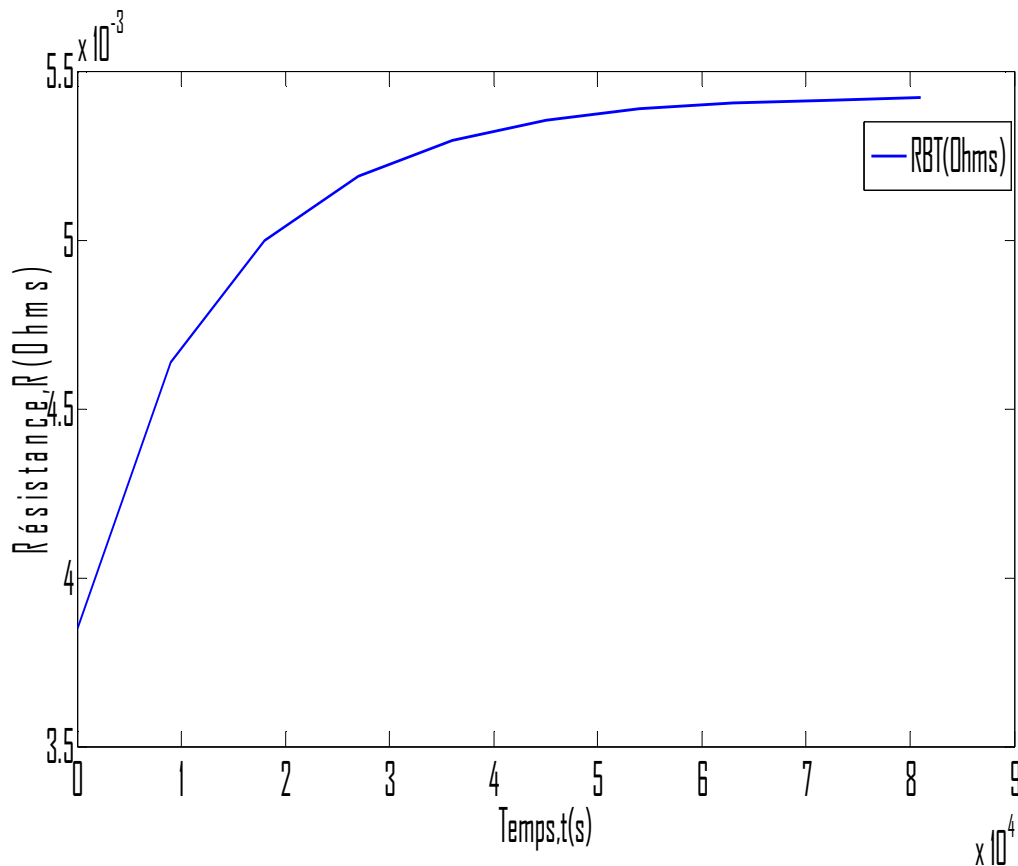


Figure III-21- résistance  $R_{BT}(\Omega)$  en fonction du temps.

La figure III-22 montre les températures dans les différentes régions du transformateur pour les deux cas traités, à savoir avec et sans prise en compte des variations des pertes Joule dans les bobines. Les courbes avec des (\*) sont celles où l'on tient compte de la variation des résistances des bobines en fonction de la température, et les courbes avec des (.) sont celles où les résistances et donc les pertes Joule volumiques sont considérées constantes.

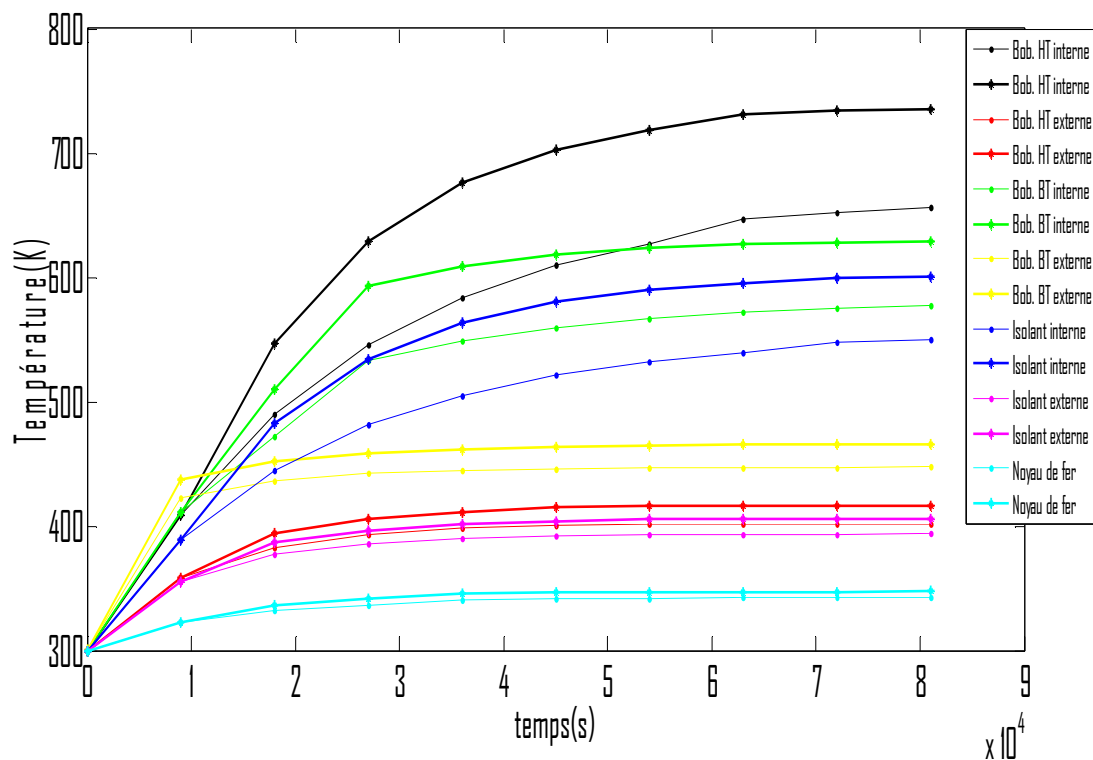


Figure III-22- Courbes comparatives des températures dans les différentes régions du transformateur avec et sans prise en compte des variations des résistances en fonction de la température.

- Nous constatant que l'évolution de la température dans les différentes régions du transformateur présente un changement de pente très net, quelques secondes après le début du transitoire.

- Notre étude de l'évolution du champ thermique a permis de mettre en évidence plusieurs périodes successives jusqu'à l'établissement du régime permanent.

- Plus les pertes Joule augmentent plus la température moyenne des matériaux augmente d'une manière remarquable au niveau des bobines un peu moins dans les autres matériaux.

### III-6 Conclusion

Le transformateur étudié est un abaisseur de tension, il transforme la tension de 30 (KV) en une tension de 400 V. Il y a forcément échauffement dû aux différentes pertes dans ce transformateur même si on a négligé les pertes supplémentaires qui ne sont prise en compte dans notre modélisation en 2D.

Dans ce chapitre, on a démontré que l'analyse par éléments finis fournit un outil efficace pour déterminer les températures dans un transformateur même dans les endroits inaccessibles. L'analyse du transfert de chaleur permet de prédire la température à tous endroits du transformateur en tenant compte de différentes conditions de fonctionnement même les plus dangereuses pour le matériel. L'intérêt est évident pour la conception et le calcul du transformateur mais aussi pour le dimensionnement des appareils de sa protection.



# **Conclusion générale**

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

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

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

Un modèle thermique est nécessaire pour la connaissance de la répartition de la température dans le transformateur étudié. Un modèle électromagnétique est tout aussi indispensable pour la détermination des différentes pertes en fonction du niveau de la charge du transformateur.

L'élaboration de ce travail qui s'est focalisé sur le modèle thermique, nous a permis d'améliorer notre connaissance dans le domaine. La théorie du champ thermique dans le transformateur reste assez compliquée à cerner surtout quand on affaire à des matériaux avec des formes complexes mais aussi avec des dimensions et des épaisseurs variantes dans de grands rapports d'un matériau à l'autre. La mise en œuvre informatique et les simulations numériques menées à terme nous ont appris à manipuler le logiciel FEMM basé sur la méthode des éléments finis.

Les résultats obtenus doivent être confrontés avec ceux des expériences effectuées sur des transformateurs existants. Dans le cas contraire, des corrections nécessaires de certains paramètres (notamment le coefficient de convection) doivent être effectuées jusqu'à l'obtention des variantes répondant aux normes en vigueur et aux spécifications du cahier des charges.

Le présent mémoire peut avoir comme perspective une étude comparative avec des essais expérimentaux d'un côté mais d'autre part le développement d'un modèle couplant les modèles thermique et électromagnétique nous parait comme étant un prolongement naturel à envisager.

# **Références bibliographiques**

- [1] : en électrotechnique, 2014, Université Mouloud Mameri Tizi Ouzou.
- [2] [http://www8.umoncton.ca/umcm-cormier\\_gabriel/Electrotechnique/Chap8.pdf](http://www8.umoncton.ca/umcm-cormier_gabriel/Electrotechnique/Chap8.pdf).
- [3] <https://illustrationprize.com/fr/691-types-of-transformer.html>
- [4] PIERE Mayé : "Aide- mémoire électrotechnique, l'usine nouvelle", Dunod, 2006, Paris.
- [5] A. BERFAS M. NEKACHE, << calcul et exploitation d'un transformateur triphasé de puissance 25/30 MVA -30KV/5.875KV>>, mémoire de fin d'études ingénieurs d'état en Électrotechnique
- [6] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Transfert\\_thermique?veaction=edit&section](https://fr.wikipedia.org/wiki/Transfert_thermique?veaction=edit&section).
- [7] <https://www.thermique55.com/principal/thermique.pdf>
- [8] ALOUACHE Oussama, MERABET Mohammed Nabil, IKHLEF Nabil : "Etude et modélisation des systèmes de refroidissements des transformateurs. ", Mémoire de diplôme Master en Électrotechnique, option machines électriques, 2020, Université de Jijel.
- [9] SOUAD Chebaani : "Modélisation thermique d'un transformateur utilisant un matériau composite fer-résine. ", Mémoire de Magistère en électrotechnique, 2012, Université de Batna.
- [10] HOANG Emmanuel : "Etude, modélisation et mesure des pertes magnétiques dans les moteurs à réluctance variable à double saillance. ", Thèse de Doctorat, 1995, Ecole normale supérieure de Cachan (Paris) France.
- [11] BERGMAN Theodore L., Lavine Adrienne S., INCROPERA Franck P., DEWITT David P.: "Introduction de heat transfert", sixth edition, JOHN WILEY & SONS, INC. 2011, USA.
- [http://bibotu.com/books/2019/Theodore%20L.%20Bergman,%20Adrienne%20S.%20Lavine,%20David%20P.%20DeWitt,%20Frank%20P.%20Incropera-Introduction%20to%20Heat%20Transfer,%20Sixth%20Edition%20-%20John%20Wiley%20&%20Sons,%20Inc.%20\(2011\).pdf](http://bibotu.com/books/2019/Theodore%20L.%20Bergman,%20Adrienne%20S.%20Lavine,%20David%20P.%20DeWitt,%20Frank%20P.%20Incropera-Introduction%20to%20Heat%20Transfer,%20Sixth%20Edition%20-%20John%20Wiley%20&%20Sons,%20Inc.%20(2011).pdf)
- [12] [https://www.electro-industries.com/IMG/pdf/FICTEC\\_1.pdf](https://www.electro-industries.com/IMG/pdf/FICTEC_1.pdf)