

*La République Algérienne Démocratique et Publique*

*Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*

*Université de Jijel*

*Faculté des Sciences et de la technologie*

*Département d'Electrotechnique*



*Mémoire de Fin d'étude*

*En Vue de l'Obtention du Diplôme de Master en Electrotechnique*

*Option : Machines électriques*

**Thème :**

**ETUDES MAGNÉTOHYDRODYNAMIQUE DES MACHINES ÉLECTRIQUES  
REFROIDIES**

*Encadré par :*

*Mr. N. IKHLEF*

*Réaliser par :*

*Cheriet islam*

*Promotion: Juin 2017*



## REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier Allah, le clément et le miséricordieux pour m'avoir donné beaucoup de patience et de courage. Je remercie également ma famille pour les sacrifices qu'elle a fait pour que je termine mes études sans problème et pour m'avoir apporté toute l'aide nécessaire pour atteindre ce niveau qui me permettra d'assurer mon avenir

Je remercie les membres du jury d'avoir pris la peine de lire et de juger ce travail.

Je voudrais remercier mon promoteur Ikhlaf Nabil Maître de Conférences classe *ET* à l'université de Jijel pour ces précieux conseils, son suivi constant et pour m'avoir laissé la liberté dans la réalisation de ce travail, sans oublier les efforts qui a fait afin de m'encadrer et je le remercie surtout pour ses qualités humaines

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous les enseignants qui ont participé à ma formation.

Et je tiens également à dire un grand merci à toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail, ne serait-ce que par des réflexions.



## DEDICACES

*Je dédie ce modeste travail aux êtres les plus chères ma mère et mon père, en reconnaissance de toutes les peines endurées et tous les sacrifices consentis à mon endroit ;*

*À mon frère Rybah et mes deux sœurs Amira et Israa que je leur souhaite réussite et Succès et pour ma nièce Daniah ;*

*À mon beau-frère Karim et ma belle sœur Fouzia ;*

*À toute ma famille ; Ainsi qu'à tous mes chers amis et mes collègues de l'Université de IJEL ;*

*ISLAM*

# *NOMENCLATURE*



## Nomenclature

Les variables définies en gras représentent des grandeurs vectorielles ou matricielles, tandis que les autres sont des scalaires. Les grandeurs entre crochet sont les unités dans le système MKSA et les valeurs entre les accolades sont les valeurs usuelles ou par défaut. Dans la suite du mémoire des termes dénommés  $U_i$ ,  $V_i$ ,  $W_i$ ,  $\Delta_i$ ,  $\Sigma_i$ , etc..... seront utilisés pour désigner plus simplement un terme contenu dans une équation.

### NOTATIONS LATINES

**A, A\*** : Potentiel vecteur magnétique (\* modifié) [T·m]

**B** : Induction magnétique [T]

**C** : Capacité [F]

$C_p$  : Chaleur massique (pression constante) [J·kg<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>]

**CT** : Facteur de vue (rayonnement)

**D** : Induction électrique [C·m<sup>-2</sup>]

**E** : Champ électrique [V·m<sup>-1</sup>]

$f$  : Fréquence [Hz]

$g$  : Accélération gravitationnelle {9.81} [m·s<sup>-2</sup>]

$G_r$  : Nombre de Grashof

$h$  : Rang harmonique

$h_{cv}$  : Coefficient d'échange thermique par convection [W·m<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup>]

$h$  : Coefficient d'échange thermique par rayonnement [W·m<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup>]

$h_T$  : Coefficient d'échange thermique global [W·m<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup>]

**H, H0, h0** : Champ magnétique (vide, courant unitaire) [A·m<sup>-1</sup>]

$I, I_m$  : Courant (de magnétisation) [A]

$j$  : Opérateur complexe { -1 }

**J** : Densité de courant [A·m<sup>-2</sup>]

$K, K_{AC}$  : Facteur de déclassement, ou de pertes additionnelles

**K'** : Densité de courant superficielle et fictive [A·m<sup>-2</sup>]

$Ln$  : Logarithme Népérien

$m$  : Rapport de transformation

$m_v$  : Masse volumique [kg·m<sup>-3</sup>]

$M$  : Inductance mutuelle [H]

$N_1, N_2$  : Nombre de spire des enroulements primaire/secondaire

$p$  : Densité volumique de perte [W·m<sup>-3</sup>]

$P$  : Puissance active, pertes (fer, cuivre, diélectriques, vagabondes,...) [W]

$Q$  : Puissance réactive [Vars]

$R$  : Résistance [ $\Omega$ ], ou résidu (Newton-Raphson)

$Ra$  : Nombre de Rayleigh

$S$  : Puissance apparente [VA] ou exposant de Steinmetz (pertes fer)

$\mathbf{S}$  : Potentiel vecteur [A]

$t$  : Temps [s]

$T$  : Température [ $^{\circ}\text{C}$  ou K]

$Tx$  : Taux de remplissage matriciel (nombre d'éléments non nuls)

$\mathbf{T}, \mathbf{t0}$  : Potentiel vecteur électrique (courant unitaire) [ $\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$ ]

$U$  : Tension totale [V]

$V$  : Tension, Potentiel scalaire électrique [V]

$w$  : Coefficient de pondération

$X$  : Réactance [ $\Omega$ ]

$Z$  : Impédance [ $\Omega$ ]

### NOTATIONS GRECOUES

$\psi$  : Flux magnétique totale/élémentaire [Wb]

$\phi, \phi_0$  : Phase électrique [ $^{\circ}$  ou rad]

$\phi_{cd}$  : Flux de puissance thermique par conduction [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

$\phi_{cv}$  : Flux de puissance thermique par convection [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

$\phi_{ray}$  : Flux de puissance thermique par rayonnement [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

$\phi \Gamma$  : Flux de puissance thermique global à l'interface [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

$\phi, \phi_{tr}$  : Potentiel scalaire magnétique total, réduit [A]

$\lambda$  : Conductivité thermique [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]

$\delta$  : Profondeur de pénétration ou épaisseur de peau [m]

$\alpha$  : Coefficient de température {cuivre :  $3.93 \times 10^{-3}$ , aluminium  $4.03 \times 10^{-3}$ }

$\alpha, \alpha_{ij}$  : Fonction d'interpolation (MEF) {2D:  $a_i + b_i x + c_i y$ , 3D:  $a_i + b_i x + c_i y + d_i z$ }

$\alpha a$  : Diffusivité thermique de l'air [ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$\beta a$  : Coefficient d'expansion volumétrique et thermique de l'air [ $\text{K}^{-1}$ ]

$\epsilon \Gamma$  : Emissivité

$\epsilon$  : Permittivité diélectrique absolue [ $\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$ ]

$\epsilon_r$  : Permittivité diélectrique relative

$\epsilon_0$  : Permittivité diélectrique du vide  $\{1/36 \pi \cdot 10^9\}$  [ $\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$ ]

- $\varepsilon_{rr}$  : Erreur relative [%]  
 $\xi$  : Racine d'un polynôme (Intégration numérique Gauss-Legendre)  
 $\mu$  : Perméabilité magnétique absolue [H·m-1]  
 $\mu_r$  : Perméabilité magnétique relative  
 $\mu_0$  : Perméabilité magnétique du vide ou de l'air  $\{4\pi \times 10^{-7}\}$  [H·m-1]  
 $\nu_a$  : Viscosité cinématique de l'air [m<sup>2</sup>·s-1]  
 $\omega$  : Pulsation  $\{2\pi f\}$  [rad·s-1]  
 $\rho$  : Résistivité électrique {cuivre :  $1.72 \times 10^{-8}$ , aluminium  $2.69 \times 10^{-8}$ , à 0°C} [ $\Omega \cdot m$ ]  
 $\rho_e$  : Densité de charge électrique libre [C]  
 $\sigma$  : Conductivité électrique  $\{1/\rho\}$  [S·m-1]  
 $\sigma_{SB}$  : Constante de Stephan-Boltzmann  $\{5.67 \times 10^{-8}\}$  [W·m-2·K-4]  
 $\theta$  : Angle [rad]  
 $\Omega$  : Domaine d'étude 2D/3D ou potentiel scalaire magnétique (MEF) [A]  
 $\Gamma$  : Contour délimitant le domaine d'étude ou une des frontières de celui-ci  
 $\eta$  : Rendement ou facteur d'espacement (homogénéisation thermique)

### AUTRES NOTATIONS

- $\Delta u$  : Variation, écart  
 $\Sigma u$  : Somme  
 $\Pi u$  : Produit  
 $u$  : Nombre complexe (notation omise pour ne pas alourdir les équations)  
 $u^*$  : Nombre complexe conjugué  
 $*$  : Produit mathématique  
 $\Re(u)$  : Partie réelle d'un nombre complexe  
 $\Im(u)$  : Partie imaginaire d'un nombre complexe  
 $\nabla \times \mathbf{u}$  : Opérateur différentiel : Rotationnel  
 $\nabla \cdot \mathbf{u}$  : Opérateur différentiel : Divergence  
 $\nabla u$  : Opérateur différentiel : Gradient  
 $du$  : Dimension élémentaire (calcul intégral)  
 $F(u)$  : Fonctionnelle  
 $x, y, z$  : Repère de coordonnées cartésiennes  
 $r, \theta, z$  : Repère de coordonnées cylindriques

*INTRODUCTION*

*GÉNÉRALE*



## Introduction Générale

Les recherches sur le développement des systèmes électriques ont occupé une grande place dans l'industrie depuis bien longtemps, mais ces dernières n'ont pas réglé tous les soucis, comme ceux du transport (dissipation) ou du refroidissement (échauffement) avec l'accroissement de la demande d'électricité et sa diversité d'utilisation dans tous secteurs, les chercheurs ont recours à d'autres technologies pour répondre à ces besoins telles que la magnétohydrodynamique [1-3]. La magnétohydrodynamique (MHD) est un domaine très vaste de la physique et très compliqué qui concerne l'interaction entre un champ électromagnétique et un fluide conducteur de l'électricité et l'une des technologies d'avenir qui peut contribuer aux développements des procédés industriels [4-6]. Pour prédire, interpréter et prévoir les phénomènes extrêmement compliqués dans ce processus d'induction, il est indispensable de recourir à des modèles aussi schématiques que possible et de préciser la correspondance entre les caractéristiques du modèle et les propriétés du phénomène physique réel.

Avec l'augmentation continue de la puissance dissipée par les composants et les systèmes électriques, le marché de l'électrotechnique de puissance a besoin de nouvelles techniques de refroidissement plus robustes et plus fiables. Les techniques de refroidissement standards utilisées aujourd'hui sont parfois insuffisantes à cause des propriétés physiques des fluides caloporteurs et plus particulièrement à cause de leur faible conductivité thermique. D'où la nécessité de faire circuler un fluide dont les propriétés thermiques plus élevées. Nous proposons, dans ce contexte, d'étudier le refroidissement des machines électriques notamment les transformateurs de puissance avec un fluide (huile ou air forcé).

L'objectif de ce travail est donc d'étudier le comportement des phénomènes MHD multiphysiques dans quelques systèmes électriques refroidis en développant des modèles numériques éléments finis.

L'étude approfondie de ces systèmes refroidis nécessite impérativement une mise en équation de des phénomènes multiphysiques intervenantes et une modélisation numérique. Elle consiste en des calculs : électromagnétique, hydrodynamique, suivi d'un autre thermique, cela sera l'objet des trois chapitres. A ce propos, nous présentons tout d'abord dans un premier chapitre des généralités sur les systèmes de refroidissement et leurs conceptions et leurs applications, particulièrement dans les machines électriques (alternateurs et transformateurs).

Nous présentons dans un deuxième chapitre, la description mathématique du problème couplé et la conception du modèle mathématique et un modèle numérique élément est rappelé pour résoudre le modèle mathématique. Il consiste à déterminer les équations aux dérivées partielles décrivant l'évolution des phénomènes physiques ainsi qu'aux principaux aspects de couplage. Les applications et les résultats obtenus par une résolution directe du modèle MHD couplé sur le logiciel Comsol Multiphysiques pour deux types de transformateurs font l'objet de troisième chapitre. Les résultats obtenus pour le refroidissement par l'huile d'un transformateur à colonne haute tension et un autre transformateur cuirassé (noyau torique) alimenté en basse tension refroidi par air forcé, sur lesquels nos modèles numériques seront implémentés et validés. Une conclusion générale fera la synthèse des principaux résultats obtenus et quelques perspectives.

# **CHAPITRE I**

*Généralités sur les systèmes*

*de refroidissements*

## I. Introduction

Une machine électrique est le siège de dissipations de différentes origines. Elles sont largement distribuées dans sa structure et, plus rarement, dans le fluide de refroidissement lui-même (transformateurs haute tension, machine à grande vitesse de rotation). Le dimensionnement thermique d'une machine électrique, c'est-à-dire le calcul du champ de température et la détermination des voies d'évacuation de la chaleur, fait appel à des lois générales et à des relations données magnétohydrodynamique (MHD) concernant les matériaux et les fluides rencontrés dans ce contexte sont apportées.

Dans le présent chapitre on s'intéresse d'abord dans un premier temps l'état de l'art des systèmes de refroidissement. Les systèmes de refroidissement sont fondés sur les principes de la thermodynamique. Ils facilitent les échanges de chaleur entre le fluide de procédé et le réfrigérant ainsi que le rejet de la chaleur non récupérable dans l'environnement. Les systèmes de refroidissement des machines électriques tels que, les alternateurs et les transformateurs qui peuvent être classés selon leur conception et le type de réfrigérant utilisé : eau ou air ou l'huile une combinaison de deux.

## II. Les Systèmes de Refroidissements Industriels

Les systèmes de refroidissement sont généralement utilisés dans des installations de grande capacité localisées sur des sites disposant de sources d'eau de refroidissement et d'eaux de surface suffisantes. En l'absence de source d'eau sûre, on utilise des systèmes de refroidissement forcé (tours de refroidissement, également appelées aéroréfrigérants).

Dans cet article on va voir les plus utilisées dans notre domaine. [7]

### II.1. Systèmes de refroidissement de liquides :

#### ➤ *par voie sèche :*

- performance thermique ajustable par le contrôle des ventilateurs ;
- circuit fermé est nécessaire ;
- le tirage forcé et induit sont utilisés ;
- le coût de la consommation électrique interne est supposé être plus élevé que pour les tours de refroidissement

#### ➤ *Par voie humide :*

- faible niveau de chaleur évacuée, c'est-à-dire moins de 100 MWth ;
- un changement de température du réfrigérant presque linéaire à celui de la température de l'air (bulbe sec) doit être acceptable pour le procédé à refroidir ;
- les coûts d'exploitation sont essentiellement constitués de coûts énergétiques ;
- les aspects environnementaux sont notamment le bruit et l'énergie.

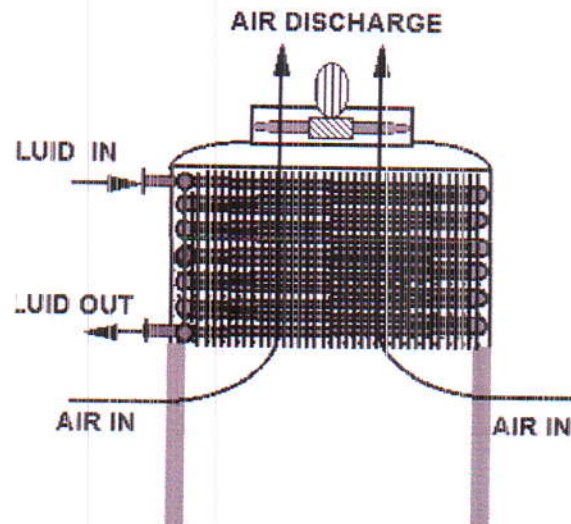


Figure I.1. : Principe d'un système de refroidissement par voie sèche



Figure I.2 : Exemple d'un refroidisseur de liquide par air sec dans un procédé chimique

### II.1.1 Condenseurs à air :

Les condenseurs à air sont très répandus dans l'industrie de production d'électricité et dans les installations chimiques pour la condensation de vapeur. L'air est aspiré par les ventilateurs sous les éléments du condenseur, puis poussé à travers l'échangeur. La circulation de l'air refroidit la vapeur qui entre dans les faisceaux de tubes du condenseur (voir Figure 3). Dans un système indirect, le condenseur est refroidi par un flux d'eau de refroidissement qui, à son tour, est refroidi dans une tour de refroidissement à tirage naturel. [8]

➤ *Caractéristiques des condenseurs à air :*

- évacuation de chaleur dans les petites et des grandes installations,
- aucune eau de refroidissement n'est requise,
- le coût de la consommation directe d'énergie est supposé être plus élevé que pour les condenseurs par voie humide ou pour les tours de refroidissement par voie humide,
- une hauteur globale relativement faible,
- les conduits de sortie de la vapeur peuvent être courts,
- l'espace situé à proximité immédiate du générateur de vapeur doit être considérable,
- adaptation nécessaire pour de larges variations de charge et de température, nécessitant une vitesse variable du ventilateur,
- les aspects environnementaux sont notamment le bruit et l'énergie.

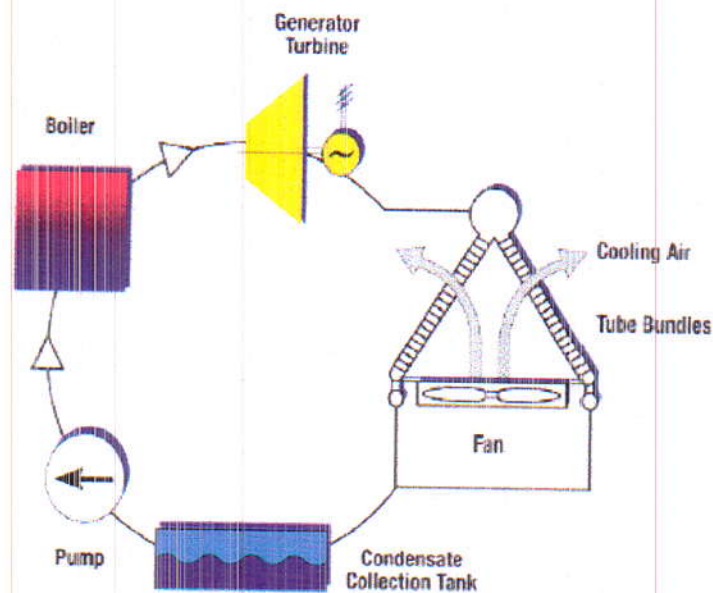


Figure I.3 : Présentation schématique du principe d'un condenseur direct à air



**Figure I.4 :** Exemple d'un condenseur à air pour la condensation des fumées d'échappement d'une turbine

## **II.2. Systèmes de refroidissement par voie humide en circuit fermé**

Dans des systèmes en circuit fermé, le fluide à refroidir circule dans un circuit fermé sans aucun contact avec l'environnement. Le fluide est conduit à travers un échangeur tubulaire ou « serpentín » (circuit primaire). Les serpentins sont mouillés sur leur face externe (circuit secondaire ou pulvérisation). La chaleur est transférée du fluide vers l'eau pulvérisée. L'évaporation d'une petite partie de l'eau amène à un refroidissement par évaporation et la chaleur est transférée de l'eau vers l'air. Il y a un transfert de chaleur sensible supplémentaire du serpentín dans l'air. En pratique, dans le cadre d'un refroidissement par évaporation, les transferts de chaleur sensible et latente sont toujours couplés. L'eau est traitée pour éviter les dommages causés au matériel. Les pertes par évaporation, fuites et entraînement vésiculaire entraînent une augmentation de la concentration en minéraux, aussi il faut purger le circuit d'eau et ajouter de l'eau d'appoint. [9]

### **➤ Application**

Les systèmes de refroidissement en circuit fermé sont utilisés dans de nombreuses applications. Ils sont bien adaptés au refroidissement des moteurs à gaz et des compresseurs, et peuvent s'avérer fiables pour contrôler les températures de procédés industriels [10]. Ils peuvent être utilisés à la fois pour les grosses et les petites applications. On peut s'en servir comme refroidisseurs de liquides (huiles lubrifiantes, eau de refroidissement pour les

compresseurs), refroidisseurs de gaz (moteurs diesel, gaz de procédé) et condenseurs à air (cycles combinés, turbines à vapeur).

Si le fluide de procédé dans le serpentin ou dans les tubes est sous forme de vapeur (gaz ou fluide frigorigène) à refroidir pour condenser en liquide, ce système de refroidissement est également appelé condenseur évaporatif.

### II.3. Systèmes de refroidissement à tirage mécanique en circuit fermé

Caractéristiques des systèmes de refroidissement à tirage mécanique en circuit fermé :

- refroidissement des petites et grandes installations,
- de faibles températures de refroidissement peuvent être atteintes,
- conception compacte par rapport au matériel refroidi à l'air,
- faibles besoins énergétiques,
- besoins en approvisionnement d'eau et en circuit d'eau pulvérisée,
- suppression de panache réalisable par des échangeurs adaptés et/ou le fonctionnement par voie sèche en hiver,
- aspects environnementaux : traitement de l'eau et récupération des effluents

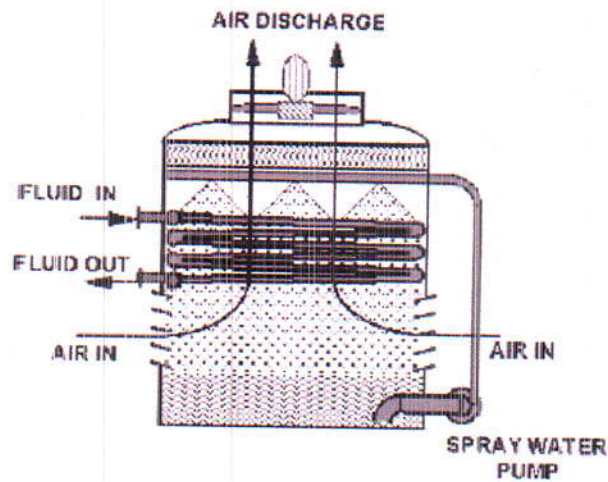


Figure I.5 : Présentation schématique du principe de la tour airoréfrigérante fermée par voie humide à tirage induit

### II.4. Condenseurs évaporatifs

Caractéristiques des condenseurs évaporatifs :

- refroidissement des installations moyennes à grandes,
- plus faibles températures de refroidissement qu'avec les condenseurs évaporatifs refroidis à l'air,
- faibles besoins énergétiques,



- en général, plus hauts que les condenseurs évaporatifs refroidis à l'air, mais avec de plus petites prises au sol,

## II.5. Systèmes de refroidissement hybrides en circuit fermé

### Description technique :

Pour les systèmes hybrides en circuit fermé, les caractéristiques peuvent être décrites de façon similaire à celles des Systèmes aérorefrigérants en ce qui concerne les ventilateurs (axiaux et radiaux), la direction du débit d'air (flux Transversal ou contre-courant) et les systèmes d'insonorisation (voir figure I.6) En général, ces unités ont de faibles besoins d'espace. Trois techniques peuvent être appliquées aux tours de refroidissement hybrides en circuit fermé : pulvérisation d'eau sur batterie à surface lisse, refroidissement adiabatique ou modes combinés.

### II.5.1. Pulvérisation d'eau sur la batterie à surface lisse :

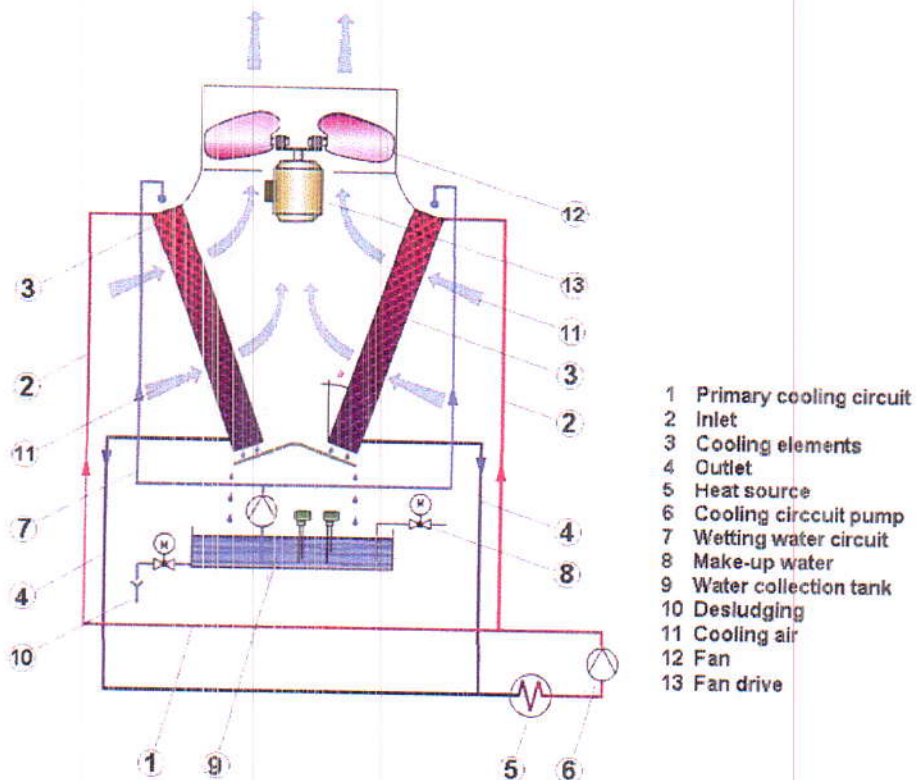


Figure I.6 : Principe de refroidissement hybride en circuit fermé

II.5.2. Refroidisseurs adiabatiques, humidification et pré-refroidissement de l'air qui refroidit les batteries :

En mode adiabatique, le fluide à refroidir contourne la batterie à surface lisse. L'eau de refroidissement dégouline sur le corps d'échange et l'air qui passe sur le corps est humidifié le plus possible. L'air humidifié passe dans les batteries à ailettes et prendra plus de chaleur que l'air sec ne le permettrait. Par rapport au matériel de refroidissement par Évaporation classique, la consommation d'eau est vraiment réduite. [9]

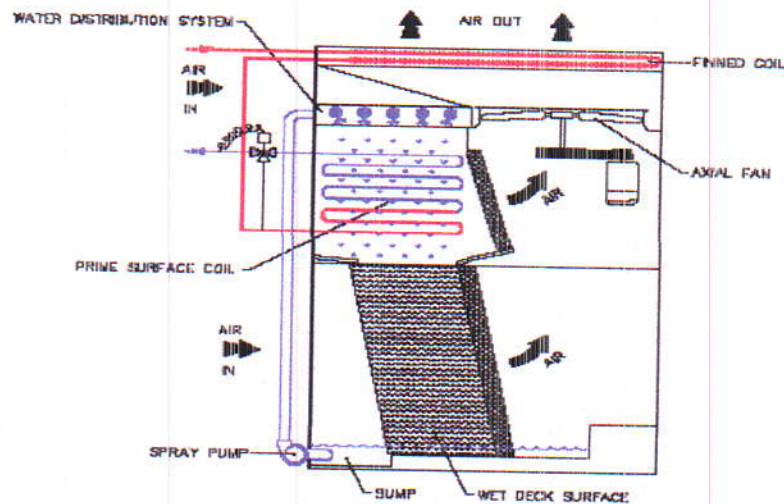


Figure I.7 : Fonctionnement combiné par voie sèche/humide d'un système de refroidissement hybride

## II.6. Systèmes aéroréfrigérants

Les descriptions données précédemment des principales configurations de refroidissement expliquent les principes de refroidissement et les différentes conceptions techniques associées utilisées dans l'industrie en fonction des exigences du procédé, du site et de son environnement. Certaines définitions clés ont été expliquées dans l'introduction comme la différence entre le refroidissement par voie sèche et par évaporation, ou entre les systèmes fermés et ouverts utilisés dans les descriptions des systèmes. L'utilisation du critère direct et indirect peut toutefois générer de la confusion s'il n'est pas replacé dans le contexte d'un système aéroréfrigérant. [10]

### III. Applications en électrotechnique

Il existe plusieurs applications des systèmes de refroidissement en électrotechnique, par exemple dans le réseau de transport d'énergie tels que : les alternateurs et transformateurs.

#### III.1. Les Alternateurs

Deux procédés sont utilisés dans les alternateurs :

- Réfrigération par hydrogène pour le rotor et le circuit magnétique stator.
- Réfrigération à l'eau pour les barres du stator.

➤ **Contrôle étanchéité des alternateurs refroidis à l'Hydrogène :**

L'alternateur est l'organe électromécanique à l'origine de la production de l'énergie électrique. Même si son rendement est excellent (proche de 99%), les puissances dissipées sous forme de pertes par effet joules sont énormes et ceci dans un volume restreint. Il est donc nécessaire de mettre en place des systèmes d'évacuation des calories basés sur l'utilisation de fluides caloporteurs circulants dans le stator, dans le rotor ainsi que dans les conducteurs statoriques. [11]

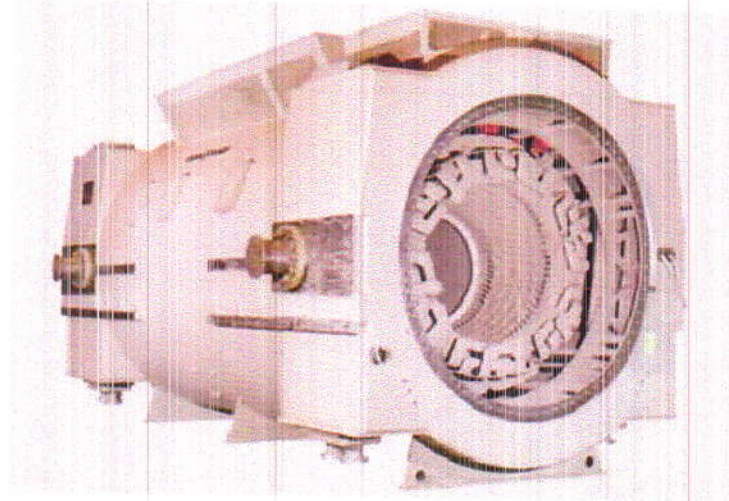


Figure I.8 : Photo d'un alternateur refroidis à l'Hydrogène

### III.1.1. Le refroidissement à l'hydrogène :

Le rôle de l'installation est d'assurer le refroidissement du rotor ; du circuit magnétique du stator et des organes frontaux de serrages de l'alternateur.

L'hydrogène a été choisi pour ses propriétés physiques supérieures à l'air :

- Sa densité est quatorze fois inférieure,
- Sa conductivité thermique est sept fois supérieure,
- L'hydrogène limite le vieillissement des isolants car il empêche la formation d'ozone,
- Son coefficient de convection est 1.5 une fois et demi plus grand,
- L'hydrogène empêche la formation d'ozone, d'où un vieillissement des isolants retardé,
- L'hydrogène pur ne brûle pas Le risque de créer un mélange détonant est éliminé en maintenant un taux de pureté > à 98% Les éventuelles fuites s'échappent à l'air libre,
- Le silence de fonctionnement est notablement amélioré.

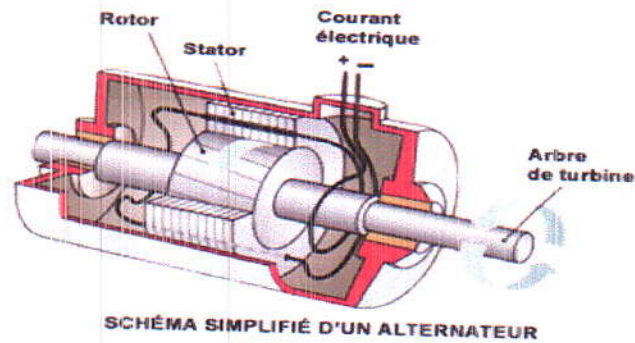


Figure I.9 : Image d'un schéma simplifié d'un alternateur

➤ **Inspection du circuit d'hydrogène :**

- **Moyens de contrôle :** Pour le contrôle étanchéité des circuits d'hydrogène des alternateurs on utilise le plus souvent des détecteurs de fuites Sélectifs à l'hydrogène. De plus pour des raisons de sécurité il est préférable d'utiliser des équipements certifiés ATEX, approuvés pour une utilisation en zone 0.
- **Les éléments à contrôler :** Si la carcasse et les paliers sont conçus pour être étanches au gaz d'autres éléments peuvent présenter des défauts d'étanchéité.



Figure I.10 : Photo d'un élément de control

➤ **Le circuit d'alimentation en hydrogène de l'alternateur :**

L'alternateur est alimenté avec de l'hydrogène pur à 99% sous une pression de 3.5 bars en moyenne avec un débit de 45m<sup>3</sup>/sec. Dans ces conditions la moindre fuite peut engendrer des pertes importantes en hydrogène, il est donc important de vérifier l'ensemble des vannes. L'étanchéité des brides est également à vérifier avec soin au niveau de la station de remplissage de l'alternateur.

➤ **L'étanchéité de l'arbre :**

L'étanchéité au niveau de l'arbre est assurée par un système d'anneau comportant une gorge dans laquelle sont logées deux bagues composées chacune de quatre segments. L'huile arrive sous pression, traverse les jeux entre les bagues et l'arbre et s'échappe en deux flux de part et d'autre du joint, séparant la partie H<sub>2</sub> et la partie en air. Le débit d'huile côté H<sub>2</sub> est récupéré et dégazé par pulvérisation sous vide. L'étanchéité des brides à cet endroit de l'alternateur doit être vérifiée avec grand soin afin d'éviter les rejets d'hydrogène à l'extérieur de la machine. Pour ce faire chaque raccord et chaque boulon doit être soigneusement contrôlé.

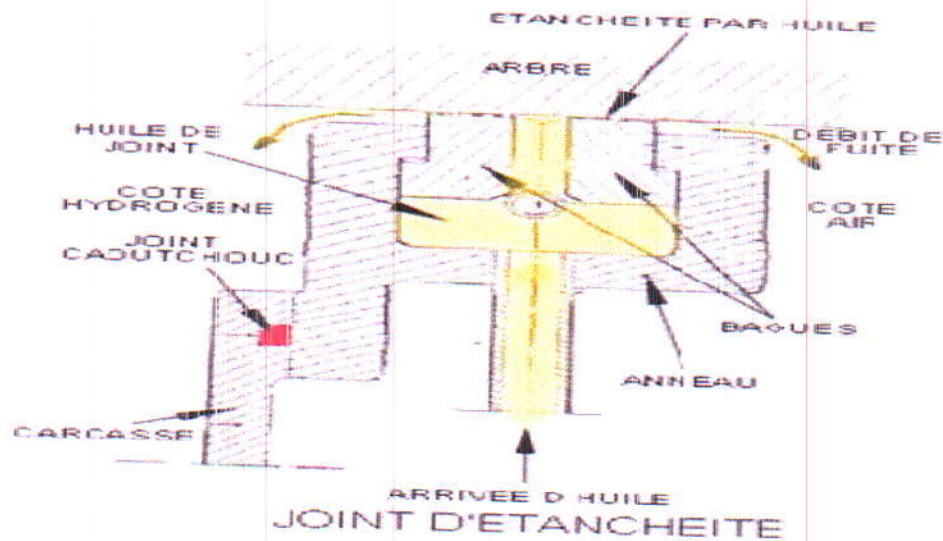


Figure I.11 : Coupe vertical du mode de refroidissement de l'alternateur

➤ **Les zones de réfrigération du gaz :**

La réfrigération de l'hydrogène est assurée par quatre réfrigérants internes à la machine, alimentés en eau. Dans cette zone c'est le serrage de l'interface H<sub>2</sub>/eau qui doit être soigneusement contrôlé.

### III.1.2. Refroidissement à l'eau des barres du stator :

Les barres du stator sont constituées de plusieurs barres élémentaires. A l'empilage il a été laissé au centre un espace, ce qui constitue un conducteur creux. L'ensemble de toutes ces cavités sont reliées entre elles au droit des têtes de bobines et alimentées en eau déminéralisée.

Le rôle de cette circulation est double :

- Assurer le refroidissement de l'enroulement statorique
- Maintenir la température de l'eau constante a l'entrée du stator afin de diminuer le déplacement relatif entre les barres du bobinage et le circuit magnétique.
- Le système permet également de protéger la machine contre le gel a l'arrêt ou de réchauffer celle-ci avant démarrage
- La circulation s'effectue en circuit fermé, avec filtration et des ioniseur permettant de maintenir une valeur de conductivité < a 5 micros Siemens / cm La valeur d'arrêt étant fixe a 9 micros Siemens.
- La circulation est assurée par deux moto pompes, l'eau est refroidie à l'aide de réfrigérants.
- Débit nécessaire au refroidissement 52m<sup>3</sup>/h
- Température entrée eau 40° ; sortie 75°
- Afin d'éviter en cas de fuites, que l'eau ne pénètre dans la machine, la pression H2 est maintenue supérieure de 0,2 bar à celle de l'eau. Une surveillance continue analyse la présence d'hydrogène dans l'eau.
- Lors d'une vidange du circuit d'eau, il est effectué des chasses d'azote dans les barres pour assécher les canaux et prévenir toute oxydation.

### III.2. Les Transformateurs

Le refroidissement est caractérisé sur les transformateurs par lettres suivantes :

Le type de fluide :

A=Air, O = Huile, W = Eau.

Le type de circulation :

N = Naturelle, F = Forcée, D = Dirigée.

Le système de refroidissement d'un transformateur a pour but de maintenir les températures des enroulements et de l'isolant (huile par exemple) à des niveaux acceptables. Le choix du mode de refroidissement se fait en particulier en fonction des paramètres suivants :

- pertes à évacuer,
- température ambiante extérieure,
- contraintes de bruit,
- contraintes dimensionnelles limitant la taille du transformateur et bien sur le cout.

### III.2.1. Le modèle OFAF (huile forcé, air forcé) :

Est conçu et fabriqué avec des tubes à ailettes en aluminium extrudées. Les refroidisseurs viennent complets avec moteurs et ventilateurs assemblés et raccordés ce qui le rend fiable est essentiellement très durable, ce type de refroidisseur est le plus couramment utilisé. [12]

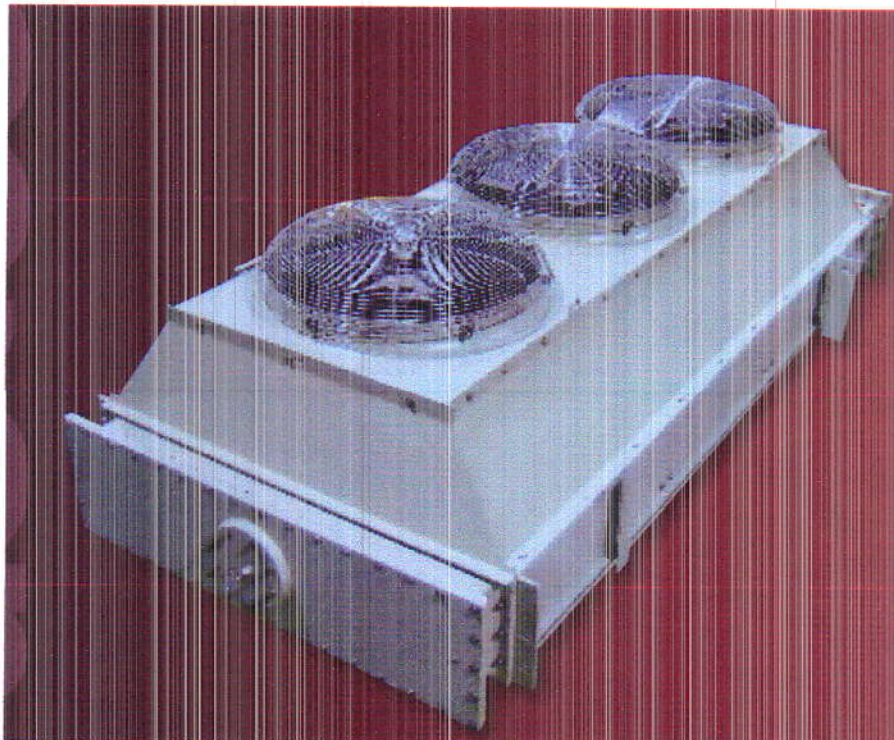


Figure I.12 : Image d'un airoréfrigérent



Figure I.13 : Images des accessoires airoréfrigérent

### III.2.2. Le modèle OFWF (huile forcé, eau forcé) :

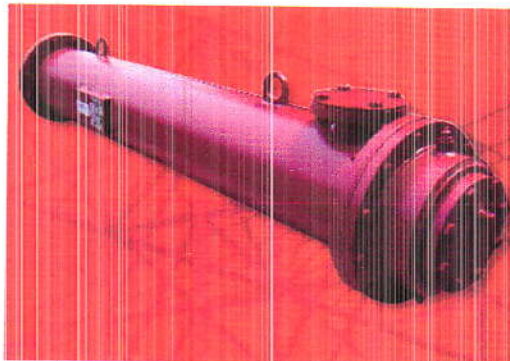
Est de type tubes et calandre, Moins utilisé mais très efficace, cet échangeur souvent de type multitubulaire permet de diminuer l'encombrement lié au refroidissement d'huile en faisant appel à de l'eau comme fluide réfrigérant différentes options de boites d'eau sont disponible permettant aussi un accès à la surface interne des tubes. L'option de détection de fuite est aussi disponible sur cet échangeur. [12]

### III.2.3. Les refroidisseurs de type "FURNACE" :

Sont constitués d'une calandre et de tubes. Dans ce cas, l'huile circule à l'extérieur des tubes dans la calandre. Le côté tube peut être à simple passe ou à passe multiple.

### III.2.4. Le modèle ONWF (huile naturel, eau forcé) :

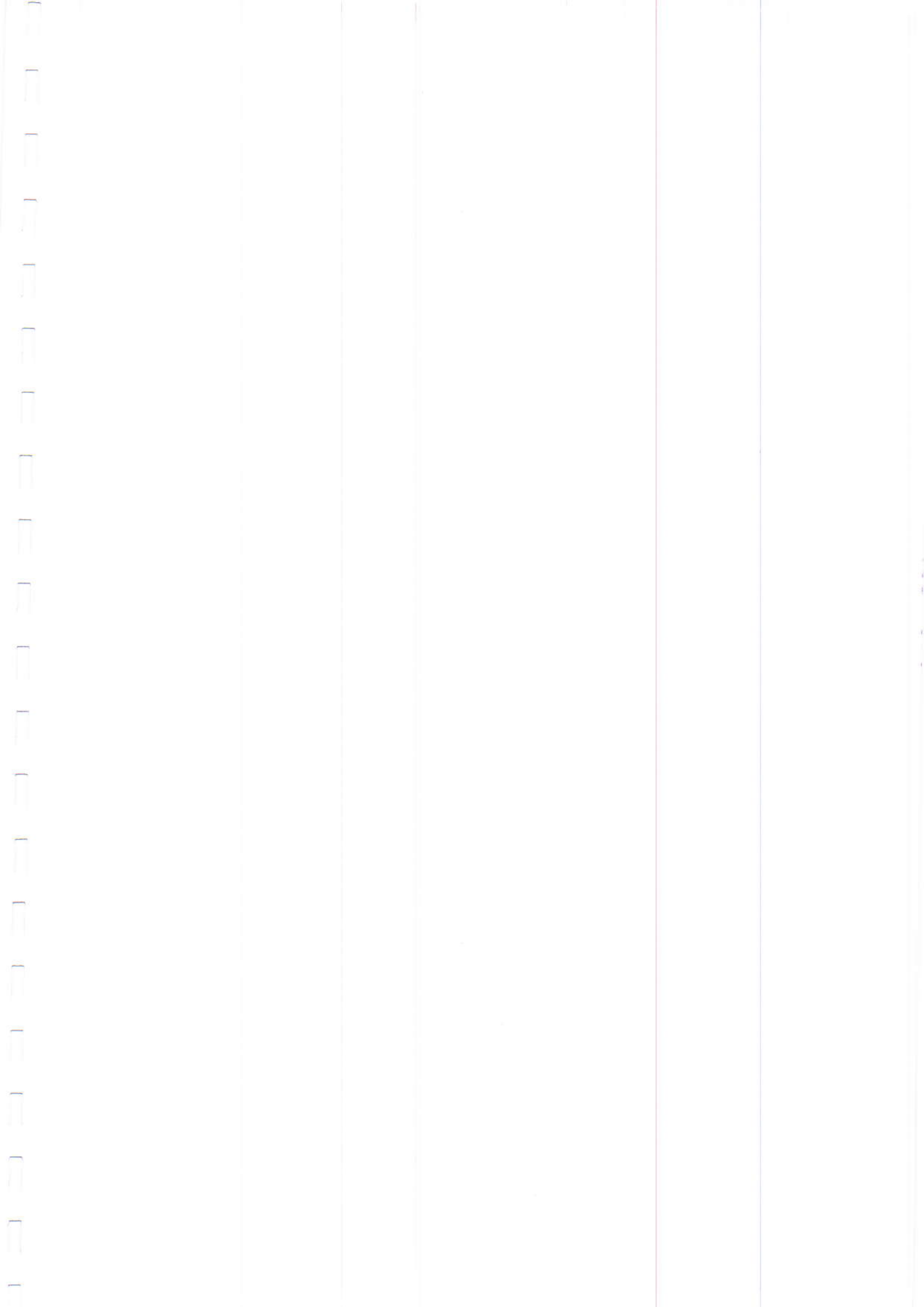
Est une conception à convection naturelle. Ce modèle est fabriqué en utilisant des tubes à ailettes en aluminium extrudées à l'intérieur d'une calandre rectangulaire pour optimiser les performances thermiques. Ce modèle peut aussi être fabriqué en utilisant deux



tubes avec double plaque tubulaire munis d'un détecteur de fuite (optionnel).

Figure I.14 : Image d'un tube de refroidissement ONWF





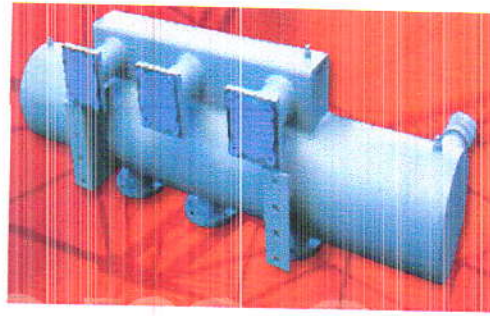


Figure I.15 : Image d'un réservoir de refroidissement ONWF

## IV .Types de Transformateurs

Il existe différents types de transformateurs du point de vue construction, deux principales technologies sont distinguées, à savoir les transformateurs à colonnes et les transformateurs cuirassés. Nous nous intéresserons à l'étude des transformateurs de puissances à l'huile car ils présentent le plus grand intérêt dans le secteur industriel et transformateur a noyau torique basse tension caractérisé par un très bon rendement refroidi par l'air.

### IV.1. Transformateur à colonnes

Le transformateur à colonnes est constitué de deux enroulements concentriques par phase. Ces enroulements sont montés sur un noyau ferromagnétique qui se referme à ses extrémités via des culasses généralement de sections circulaires afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique. Dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique (figure I.16).

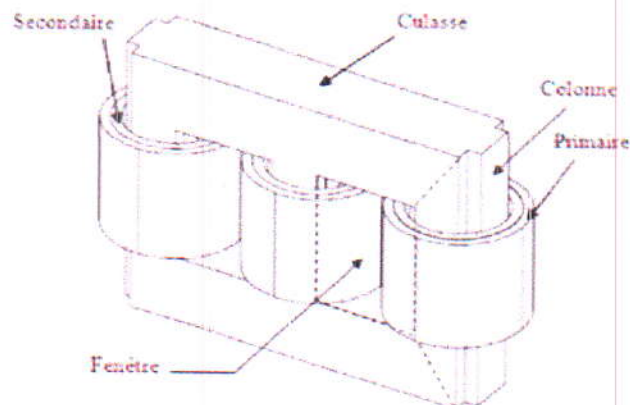


Figure I.16 : Transformateur à colonnes

#### IV.1.1 Le Circuit magnétique :

Le noyau est composé d'un empilage de tôles ferromagnétiques à cristaux orientés, isolées électriquement entre elles a fin de réduire les pertes par courants de Foucault. Les tôles de circuit magnétique de type (Fe-Si), à grain orienté laminé à froid, ont une épaisseur qui varie de 0.15mm à 0.3mm [13]. Des joints enchevêtrés et orthogonaux effectuent la liaison entre les colonnes et les culasses sur les transformateurs de petite puissance. Ces joints qui constituent une succession de stratifications jouent un rôle important dans la performance du noyau afin d'obtenir une stabilité mécanique plus élevée, et diminuent également le bruit des vibrations pendant le fonctionnement du transformateur. [14-15].

L'espace délimité par deux colonnes successives et les culasses est dénommé "fenêtre magnétique" et accueille donc les bobinages [16].

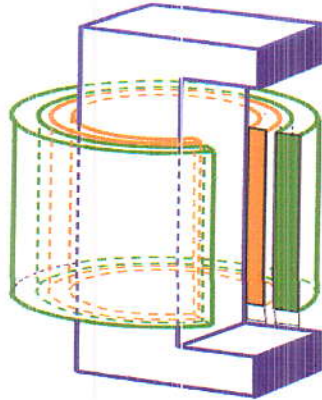


Figure I.17 : Enroulement de transformateur type colonne

#### IV.1.2 Limitations des transformateurs à colonnes :

Le circuit magnétique des transformateurs à colonnes est plus grand en volume que celui d'un type cuirassé. Par conséquent, le nombre de spires et le rapport volumique entre les matériaux conducteurs et ferromagnétiques sont plus importants. Par ailleurs ce type de construction qui a fait ses preuves pour des puissances relativement faibles (environ jusqu'à 30 KVA), présente quelque difficultés pour des fortes puissances (plus de 100 KVA) et des tensions plus élevées. Pour des tensions supérieures à 220 KV, certains constructeurs ont abandonné la construction du transformateur à colonne au profit de la structure cuirassée.

#### IV.2 Transformateur cuirassé

Dans cette technologie, le circuit magnétique entoure les enroulements formés de bobines rectangulaires à axe horizontal. Le circuit magnétique, de section rectangulaire est

constitué de tôles posées à plat. La cuve assure le calage du circuit magnétique et des enroulements.

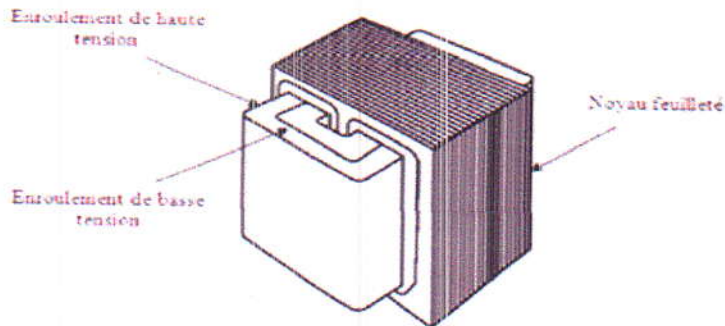


Figure I.18 : Transformateur type cuirassé

Ces transformateurs sont utilisés au sein des réseaux de transport et de répartitions où les surtensions transitoires sont fréquentes. Dans cet environnement, ils doivent se prémunir des effets néfastes de ces surtensions sur les enroulements. Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobinages.

#### IV.2.1. Les enroulements :

Dans ce type de construction la bobine qui est en fait une grande spirale rectangulaire très plate (galette), contient un certain nombre de spires, chaque spire étant elle-même constituée d'une ou de plusieurs couches de conducteurs. Les galettes sont alternées entre la haute et la basse tension afin de diminuer les fuites magnétiques et le gradient de tension. En outre, cette topologie offre l'avantage d'engendrer des forces en opposition entre chaque galette lors de court-circuit. [17]

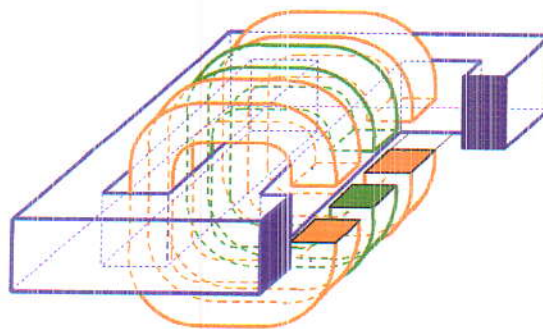


Figure I.19 : Enroulement de transformateur type cuirassé

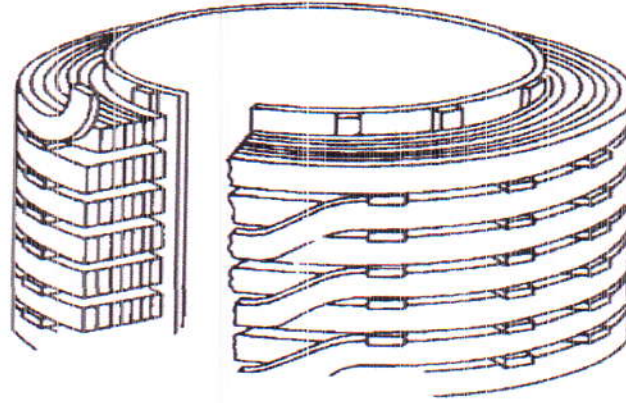


Figure I.20 : Construction des enroulements en galettes

#### IV.2.2. Avantages et inconvénients du transformateur cuirassé :

Le transformateur cuirassé possède un circuit magnétique plus court, ce qui permet d'avoir un courant à vide relatif plus faible et ses enroulements sont plus simples car le nombre de spires est moins grand vu que la section du noyau dans un transformateur cuirassé peut être plus grande que dans le transformateur à colonnes.

Mais il présente aussi certains inconvénients : ses enroulements sont moins accessibles à l'agent refroidissant, l'examen et la réparation sont plus difficiles et demande d'avantage de matériaux isolants pour la haute tension.

#### Conclusion

Les systèmes de refroidissement décrits dans ce chapitre sont utilisés dans de nombreux secteurs industriels et spécifiquement dans l'électrotechnique dans lesquelles ces systèmes ont un rôle principal dans la bonne conduite de ces derniers secteurs cités car la surchauffe des machines conduit à leurs pertes.

Il existe un grand nombre d'applications, de techniques et de pratiques opérationnelles, de plus, les caractères thermodynamique et magnétohydrodynamique du procès entraîne de nombreuses variations de performance des systèmes électriques et a des impacts différents sur l'environnement, notre étude est précise sur l'étude des phénomènes magnétohydrodynamique au sein des systèmes électriques refroidis qui sera l'objet des prochains chapitres.

# CHAPITRE II

*Les Phénomènes*

*MHD*

*Multiphysiques*



## I. Introduction

Comme il a été défini au chapitre précédant au siens des systèmes de refroidissement des machines électriques il existe plusieurs phénomènes multi-physiques qui définissent la procédure du refroidissement, dans ce chapitre on va présenter les différents modèles mathématique décrivant les phénomènes magnétohydrodynamiques et décrire les méthodes de résolution de leurs équations.

En utilisant les équations de Maxwell et les lois constitutives du milieu, on détermine les paramètres électromagnétiques relatifs à chaque problème. Pour le problème hydrodynamique, c'est l'équation de Navier Stokes associée aux propriétés du fluide (densité de charge et viscosité dynamique ou cinématique) qui permet de déterminer la variation de la vitesse d'écoulement et de la température lors de refroidissement d'une machine électrique tel que les transformateurs. Le couplage entre ce système d'équations qui sont respectivement les équations électromagnétiques et d'écoulement est réalisé par un terme source qui est régi par les forces de Lorentz. Les équations de diffusion de la chaleur permettent de définir la variation de la température est réalisé par un terme source qui est régi par la puissance par effet de Joule.

## II. Les Phénomènes Multiphysiques

### II.1 La Magnétohydrodynamique (MHD)

La magnétohydrodynamique est une discipline complexe, qui naît de la rencontre de la mécanique des fluides et de l'électromagnétisme. Ses effets apparaissent au cœur de notre planète, des étoiles. Dans ce qui va suivre nous présentons les formulations mathématiques modélisant le système électrique refroidi (transformateurs), et qui expriment les phénomènes couplés : l'électromagnétisme (équations de Maxwell) et hydrodynamique (équations de Navier Stokes). Ainsi certaines hypothèses permettant de simplifier ces équations [18].

### II.2 Equations de Maxwell

Les équations de Maxwell, aussi appelées équations de Maxwell-Lorentz, sont des lois fondamentales de la physique [19]. Elles constituent les postulats de base de l'électromagnétisme, avec l'expression de la force électromagnétique de Lorentz. Ces équations traduisent sous forme locale différents théorèmes (Gauss, Ampère, Faraday) qui régissaient l'électromagnétisme avant que Maxwell ne les réunisse sous forme d'équations intégrales. Nous présentons les équations de Maxwell permettant de formaliser les relations entre les différentes entités électrotechniques.

L'ensemble phénomènes électromagnétiques peut être décrit par six grandeurs qui dépendent du temps et l'espace et qui sont :

- $\vec{E}(x, t)$  : Champ électrique [ $v. m^{-1}$ ]
- $\vec{B}(x, t)$  : Induction magnétique [T]
- $\vec{H}(x, t)$  : Champ magnétique [ $A. m^{-1}$ ]
- $\vec{D}(x, t)$  : Induction électrique [ $c. m^{-3}$ ].
- $\rho$  : Densité de charge volumique [ $c. m^{-3}$ ].
- $\vec{j}(x, t)$  : Densité de courant surfacique [ $A. m^{-2}$ ]

Ces différentes grandeurs sont liées par les équations de Maxwell qui décrivent, de façon générale associés aux équations de constitutives des matériaux :

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

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{II-1})$$

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

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

$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II-2})$$

Cette deuxième équation est connue également sous le nom de loi de Faraday-Lenz : la circulation du champ électrique le long d'un contour fermé est égale et opposée à la variation de flux de l'induction magnétique par rapport au temps.

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

$$\text{Div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II-3})$$

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

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II-4})$$

Dans les basses fréquences on néglige le terme  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  (courants de déplacement).



➤ *Formes intégrées des équations de Maxwell :*

Nous allons voir que, à partir de ces grandeurs locales, les phénomènes physiques font la plupart du temps intervenir des expressions intégrées des équations de la physique. De même, les grandeurs généralement mesurables sont elles-mêmes des grandeurs intégrées (force, puissance thermique, tension, courant. . .).

Ces équations montrent notamment qu'en régime stationnaire, les champs électrique et magnétique sont indépendants l'un de l'autre, alors qu'ils ne le sont pas en régime variable.

Dans le cas le plus général, il faut parler du champ électromagnétique.

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

➤ *Equations de maxwell sous la forme globale*

➤ *Equation de maxwell-Gauss :*

$$\oiint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (\text{II-5})$$

$$Q = \iiint \rho \, dv$$

Ce résultat qui exprime que le flux du champ électrique à travers toute surface fermée est égal à la somme des charges intérieures sur  $\epsilon_0$  est connu sous le nom de théorème de Gauss. Il montre que le champ électrique peut lui diverger à partir de points où se trouvent des charges électriques. Le « théorème de Gauss » est donc vrai en régime variable.

➤ *Equation de maxwell-faraday :*

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{II-6})$$

$$\Phi = \iint \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

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

➤ *Loi de conservation de flux de l'induction magnétique :*

$$\oiint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (\text{II-7})$$

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

➤ *Equation de maxwell-Ampère :*

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \iint \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{s} \quad (\text{II-8})$$

$$I = \iint \vec{j} \cdot d\vec{s} \quad (\text{II-9})$$

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

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

### II.2.2. Relations constitutives des Matériaux

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

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

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

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

Où les tenseurs  $\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$  sont la permittivité, électrique, la perméabilité magnétique et la conductivité électrique respectivement et qui dépendent, entre autres, de la fréquence (ils peuvent aussi dépendre de la position, de la température, de la pression, etc.). Les éléments de ces tenseurs sont complexes, ce qui entraîne bien sûr un déphasage entre  $\vec{D}$  et  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$  et  $\vec{H}$ ,  $\vec{j}$  et  $\vec{E}$ . Ils peuvent aussi avoir un comportement non linéaire.

Cependant pour l'immense majorité des cas en exploration électromagnétique, les propriétés physiques tensorielles exprimées ci-haut peuvent être simplifiées moyennant ces hypothèses :

- ✓ tous les milieux sont linéaires, isotropes et homogènes et leurs propriétés physiques ne varient qu'avec la fréquence [21].

- **Relation magnétique**

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

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (\text{II-10})$$

$\mu_0$  : Perméabilité magnétique du vide égale à  $4.\pi.10^{-7}$  [H/m].

$\mu_r$  : Perméabilité relative du matériau considéré [H/m]

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

$$\vec{B} = \mu(\vec{H}) \vec{H} \quad (\text{II-11})$$

$\mu$  : est une fonction du module de H [H/m].

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

$$\vec{B} = \mu_a \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II-12})$$

$\mu_a$  : Perméabilité de l'aimant

$B_r$  : induction rémanent de l'aimant [T]

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

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (\text{II-13})$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (\text{II-14})$$

$\epsilon_0$  : permittivité diélectrique à vide égale à  $10^{-9}/36 \pi$  [F/m].

- **Lois d'Ohm généralisé :**

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

$$\vec{J} = \vec{J}_{ex} + \sigma \vec{E} + \sigma(\vec{V} \wedge \vec{B}) \quad (\text{II-15})$$

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

$\sigma \vec{E}$  : Densité des courants induits des champs électriques E [A/m<sup>2</sup>].

$\sigma(\vec{V} \wedge \vec{B})$  : Densité des courants induits résultant au mouvement E [A/m<sup>2</sup>].

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

$$\vec{J} = \vec{J}_{ex} + \sigma \vec{E} \tag{II-16}$$

Avec :

$\sigma$  : La conductivité électrique [Ω/m]

### II .2.3. Conditions de passage :

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

L'étude d'une structure  plusieurs régions homogènes détermine d'abord les champs dans chaque région avec la forme locale des équations de Maxwell, puis applique les conditions aux limites fournies par la forme globale des équations.

On définit une surface ou un volume de part et d'autre de la surface de séparation et on applique les équations de Maxwell sous forme intégrale.

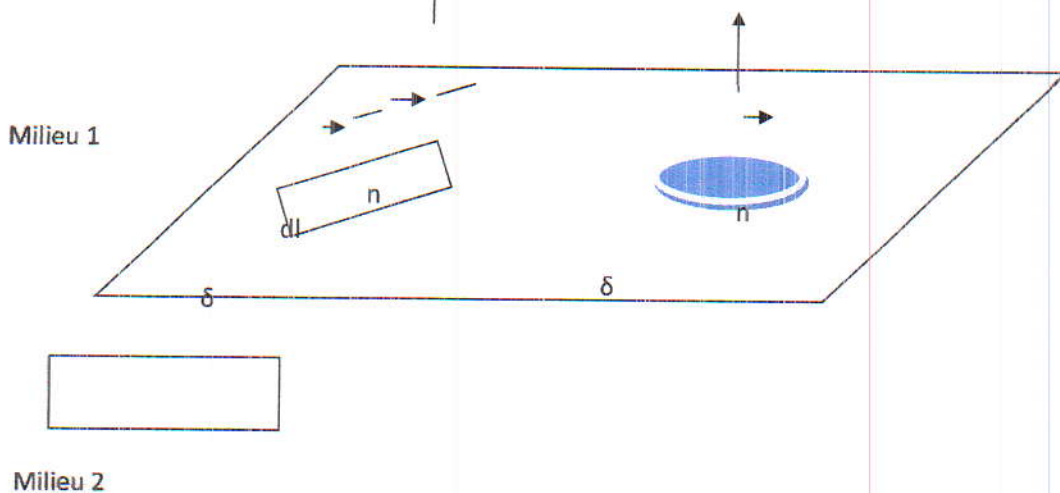


Figure II-1 : Surface et volume d'intégration entre deux milieux.



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

➤ **Conditions sur les composantes tangentielles**

On applique les relations intégrales à la surface de gauche dans la figure. Quand la hauteur du contour tend vers zéro, l'aire comprise à l'intérieur s'annule et il en va de même pour les flux des champs  $\vec{B}$  et  $\vec{D}$ . En revanche, la contribution de la densité de courant ne s'annule pas lorsque la limite du produit  $\vec{J}_x \delta$  donne le courant de surface  $\vec{J}_s$ . Comme la surface d'intégration a été choisie de façon arbitraire par rapport à la surface de séparation, la condition limite doit rester valable quelle que soit l'orientation, ce qui n'est possible que si

$$\vec{n}_{12} * (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) = \vec{J}_s \quad (\text{II-17})$$

$$\vec{n}_{12} * (\vec{E}_1 - \vec{E}_2) = 0 \quad (\text{II-18})$$

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

Les composantes du champ électrique tangentiel à la surface entre deux milieux sont toujours continues de part et d'autre de la surface. En revanche, les composantes tangentielles du champ magnétique sont discontinues lorsqu'une densité surfacique de courant  $\vec{J}_s$  circule sur la surface de séparation.

➤ **Conditions sur les composantes normales**

On intègre les équations sur la surface de droite de la figure et on fait tendre  $\delta$  vers zéro. Le volume et contributions des parois latérales s'annulent et la seule charge qui reste est la charge de surface. Comme les relations doivent être valables quel que soit le volume choisi, obtient les relations suivantes pour les composantes normales.

$$\vec{n}_{12} * (\vec{D}_1 - \vec{D}_2) = \rho_s \quad (\text{II-19})$$

$$\vec{n}_{12} * (\vec{B}_1 - \vec{B}_2) = 0 \quad (\text{II-20})$$

Où  $\rho_s$  est la densité de charge de surface, la composante normale de  $\vec{B}$  est toujours continue, tandis que celle du champ de déplacement  $\vec{D}$  est discontinue lorsqu'il y a des charges de surface.

### II.2.4. Conditions aux limites naturelles

Les valeurs d'un champ  $X$  à la frontière du domaine satisfait principalement deux relations simples. Il peut être soit de valeur connue soit normal à la surface ce qui se traduit par :

➤ **Conditions aux limites spatiales et temporelles :**

Les valeurs d'un champ  $U$  aux frontières peuvent satisfaire principalement deux conditions simples [22], Ainsi aux limites du domaine, ce champ peut être soit normal (domaine symétrique) (II-21), soit de valeur connue (II-22), ce qui se traduit par :

➤ Condition de Neumann :  $\frac{\partial U}{\partial t} = 0$  (II-21)

➤ Condition de Dirichlet :  $U \cdot n = 0$  (II-22)

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

### II.2.5. Conditions de Jauge

Les relations constitutives des matériaux, les conditions de passage, ainsi que les conditions aux limites ne suffisent pourtant pas à assurer l'unicité d'une solution et l'utilisation de jauges est nécessaire à la résolution des équations de Maxwell.

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

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

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

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

### II.2.6. Différentes Formulations Electromagnétiques

Dans le cas général, le domaine de représentation d'un problème magnétodynamique est constitué (figure II.2) : d'un inducteur  $\Omega_1$  parcouru par une densité de courant  $J_0$ , de région conductrice simplement connexe  $\Omega_2$ , multiplement connexe  $\Omega_3$ , ou de type mince  $\Omega_4$  et siège de courants induits. Il comporte également des régions ferromagnétiques isolantes simplement connexes ( $\Omega_5$ ) ou multiplement connexes ( $\Omega_6$ )

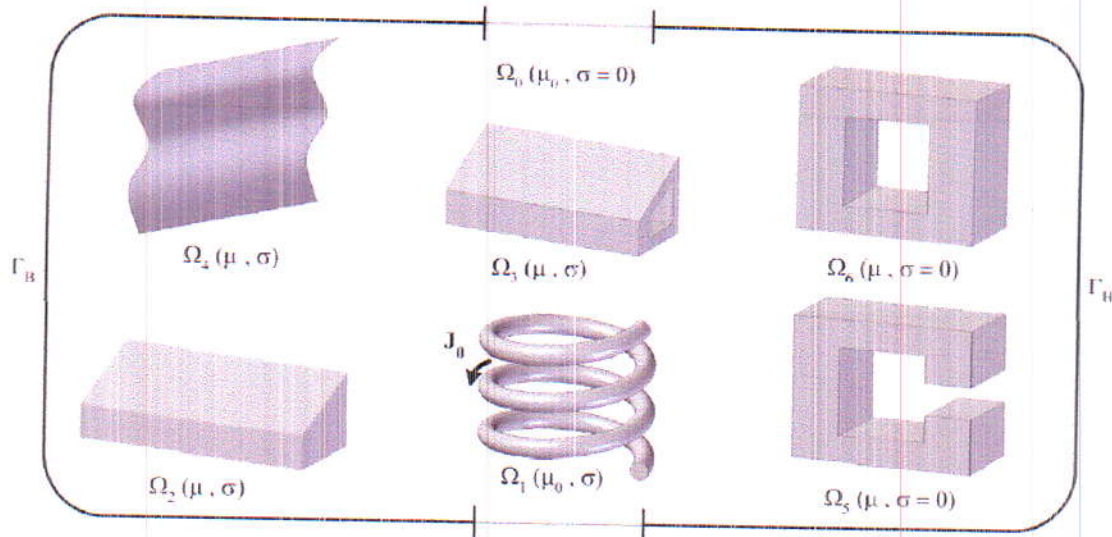


Figure II-2 : Domaine d'étude générique d'un problème magnétodynamique

Le domaine d'étude  $\Omega$  englobe ces régions distinctes ainsi que celle du milieu environnant  $\Omega_0$ . Il est notamment limité par des frontières  $\Gamma_B$ ,  $\Gamma_H$ , sur lesquelles sont annulées respectivement la composante normale de l'induction magnétique et la composante tangentielle du champ magnétique.

La résolution du problème électromagnétique quasi stationnaire, dans le domaine  $\Omega$ , nécessite le choix d'une formulation basée sur une grandeur caractéristique et en association avec les relations constitutives, les relations de passage, les conditions aux limites et les conditions de jauge. On distingue deux catégories de formulations basées soit sur le champ électrique  $\mathbf{E}$ , soit sur le champ magnétique  $\mathbf{H}$ . La première catégorie inclut surtout la formulation en potentiel vecteur magnétique  $\mathbf{A}$  et ses variantes. La deuxième catégorie comprend des formulations en  $\mathbf{H}$  ou la formulation en  $\mathbf{T}-\Omega$ . [20]

### II.1.6.1. Phénomène Electrostatique

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

Le champ électrique:

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}V \tag{II-23}$$

Et l'équation (II-2) devient :

$$\overrightarrow{\text{Rot}} \vec{E} = 0 \quad (\text{II-24})$$

Dans le référentiel d'étude les équations correspondants sont (II-18), (II-1) et (II-9)

Le modèle se ramène alors à l'équation suivante :

$$\text{Div}(\varepsilon \overrightarrow{\text{grad}} V) - \rho = 0 \quad (\text{II-25})$$

L'inconnue est une scalaire « V » ce qui impose donc une seule valeur à calculer en chaque point, lorsque les conditions aux limites du problème à étudier s'expriment en fonction de « V » ou de sa dernière normale, l'unicité de la solution est assuré.

### II.1.6.2. Formulation du modèle magnétostatique :

#### ➤ Formulation en potentiel vecteur magnétique A

Comme le modèle précédent on suppose que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps, le terme  $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$  est nul et le champ électrique  $\vec{E}$  et magnétique  $\vec{H}$  sont découplés par contre on désire de modéliser un objet parcourus par des courants non nuls, on obtient alors les équations (II-3), (II-4) et (II-12).

L'équation (II-3) permet de définir une fonction vectorielle  $\vec{A}$  appelée potentiel vecteur magnétique telle que l'on a :

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \quad (\text{II-26})$$

Pour que  $\vec{A}$  soit totalement défini, on doit fixer sa divergence en utilisant la gauge de coulomb:

$$\text{Div} \vec{A} = 0 \quad (\text{II-27})$$

D'après ces équations on obtient :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \left( \frac{1}{\mu} \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A}) \right) = \vec{j} + \overrightarrow{\text{rot}} \left( \frac{\vec{B}r}{\mu} \right) \quad (\text{II-28})$$

#### ➤ L'unicité de la solution :

Dans les problèmes bidimensionnels (système suffisamment long ou à symétrie axiale), le potentiel vecteur magnétique se réduit à une seule composante, ce qui rend ce modèle attrayant pour la résolution de tels problèmes.



Dans le cas tridimensionnel (3D) la résolution d'EDP donne une infinité de solution, pour assurer que la solution est unique on ajoute la condition de Jauge de Colomb comme terme pondérateur.

➤ **Formulation en potentiel scalaire magnétique total :  $\Phi_t$**

Lorsqu'il n'existe aucune source de courant dans une région, le rotationnel du champ magnétique est nul, et les champs ne dépendent pas du temps, ce qui signifie que le champ dérive d'un potentiel scalaire magnétique :

$$\text{Div } \vec{B} = 0 \quad (\text{II-3})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = 0 \quad (\text{II-29})$$

C'est le cas des dispositifs pour lesquels les champs sont créés par les forces magnétomotrices extérieures et indépendantes du dispositif étudié, ou bien par l'effet d'aimant permanent pour lesquels on a la loi :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II-10})$$

Cette relation implique qu'il existe une fonction  $\phi$  potentielle scalaire magnétique telle que :

$$\vec{H} = -\overrightarrow{\text{grad}} \Phi_t \quad (\text{II-30})$$

On obtient alors :

$$\text{div}(\mu \vec{H}) = 0 \quad (\text{II-31})$$

$$\text{div}(\mu (\overrightarrow{\text{grad}} \Phi_t)) = 0 \quad (\text{II-32})$$

**Remarque :** l'inconnu  $\Phi_t$  un seul inconnu par point (réduire le cout de calcul). Cette formulation présente l'inconvénient qu'elle est uniquement applicable dans les régions simplement connexes.

### II.2.6.3. Formulation du modèle magnétodynamique

Avec le modèle magnétodynamique les champs E et H sont liée par la loi d'induction. Alors les quatre équations de Maxwell interviennent pour la description des phénomènes électromagnétiques, Des courants induits apparaissent dans les conducteurs suite au champ électromoteur E issue de la loi d'induction (équation de Maxwell-Faraday).

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

$$\overline{\text{Div}} \vec{B} = 0 \quad (\text{II-3})$$

L'équation de conservation du flux permet d'introduire le potentiel vecteur magnétique  $\vec{A}$  tel que :

$$\vec{B} = \overline{\text{rot}} \vec{A} \quad (\text{II-33})$$

On a : quel que soit le scalaire  $V$  :

$$\overline{\text{Rot}}(\overline{\text{grad}}V) = 0 \quad (\text{II-34})$$

$$\overline{\text{Rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \overline{\text{Rot}}(\overline{\text{grad}}V) \quad (\text{II-35})$$

$$\overline{\text{Rot}} \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\text{rot}} \vec{A}) - \overline{\text{Rot}}(\overline{\text{grad}}V) \quad (\text{II-36})$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overline{\text{grad}}V \quad (\text{II-37})$$

D'après l'équation de Maxwell-Ampère (II-4) et l'équation (II-16):

$$\overline{\text{rot}}\left(\frac{1}{\mu}\overline{\text{rot}}(\vec{A})\right) + \sigma\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overline{\text{grad}}V\right) = \vec{j}_{\text{ex}} \quad (\text{II-38})$$

Équation différentielle avec deux inconnue le couple (A,V).

Il faut ajouter une deuxième équation, à partir de la conservation de la densité de courant induit dans un matériau conducteur :

$$\overline{\text{Div}} \vec{j}_{\text{ind}} = 0 \quad (\text{II-39})$$

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

$$\overline{\text{rot}}\left(\frac{1}{\mu}\overline{\text{rot}}(\vec{A})\right) + \sigma\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overline{\text{grad}}V\right) = \vec{j}_{\text{ex}} \quad (\text{II-38})$$

$$\overline{\text{Div}} \left[\sigma\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overline{\text{grad}}V\right)\right] = 0 \quad (\text{II-40})$$

Si les sources d'excitation sont de nature alternatives de pulsation ( $\omega = 2\pi f$ ), on peut utiliser la représentation de Fresnel pour modéliser leur variation temporelle. L'utilisation des nombres complexes permet alors de remplacer le terme :

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = j\omega \vec{A} \quad (\text{II-41})$$

## II .3. Modèle Thermique

Pour une classe d'isolation donnée, la température du point chaud limite la puissance du dispositif. Il est donc important d'évaluer cette température le plus précisément possible et donc pour cela d'étudier les modes de refroidissement intervenant [22].

Les différents échanges thermiques s'effectuent par conduction, convection ou rayonnement et diffèrent sensiblement selon la gamme et le type de dispositif.

Les échanges thermiques sont majoritairement dus aux phénomènes de conduction et de convection.

Le rayonnement n'est alors significatif que pour des points chauds mais intervient mathématiquement dans la formulation des conditions aux limites [23].

### II .3.1. Equations de Transfert de Chaleur

#### II.3.1.1. Conduction Thermique

La conduction correspond à un transfert de chaleur à l'intérieur de corps solides, par un flux de puissance  $\Phi$ . On distingue :

D'une part les phénomènes de conduction simple pour lesquels le corps considéré n'est le siège d'aucun phénomène thermique ; par exemple : conduction à l'intérieur d'un mur. D'autre part les phénomènes de conduction vive où le corps étudié est le siège d'une création de chaleur ; par exemple : barre en cuivre parcourue par un courant électrique [24]. Les calculs concernant la transmission de la chaleur par conduction sont basés sur la loi de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

$$\vec{\Phi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (\text{II-42})$$

Equation de la chaleur :

$$\Delta T - \frac{\delta}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{p}{\lambda} = 0 \quad (\text{II-43})$$

Où :

T : température en [K].

$\vec{\Phi}$ : le flux de chaleur transmis par conduction [ $\text{W.m}^{-2}$ ].

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

P : sources volumique de chaleur [ $\text{W.m}^{-3}$ ]

Pour des géométries simples, se réduit à la relation :

$$\Phi_{ij} = \frac{\lambda S}{d} (T_i - T_j) \quad (\text{II-54})$$

$\Phi_{ij}$  : flux échangé entre deux points i et j en [W].

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

S : surface d'échange en [ $\text{m}^2$ ].

$T_i, T_j$  : températures des deux points en [K].

d : distance entre les deux points en [m].

$\lambda$  est caractéristique du milieu « conducteur ». Sa valeur est fonction de la température mais est le plus souvent considérée comme constante.

L'évolution vers l'équilibre thermique se fait par transfert de la chaleur des parties actives (appareils, conducteurs...) où elle est générée, aux parties en contact avec l'extérieur qui la transmettent, à leur tour, au milieu environnant.

### II.3.1.2. Convection Thermique

Le transfert de chaleur par convection correspond à un transfert de chaleur entre un corps solide et un fluide en mouvement.

Selon l'origine du mouvement du fluide on distingue la convection naturelle et la convection forcée. Dans nos études thermiques, nous nous sommes limités à des dispositifs refroidis par une convection naturelle.

Ce transfert est caractérisé par des coefficients d'échange  $h_i$  :

$$\Phi_i = h_i S_i (T_f - T_i) \quad (\text{II-45})$$

Avec :

$\Phi_i$  : flux de chaleur échangé à la surface  $S_i$  en [W].

$S_i$  : surface de contact solide/liquide [ $\text{m}^2$ ].

$h_i$  : coefficient d'échange en [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ].

$T_i, T_f$  : températures du fluide et de la surface d'échange en [K].

### II.3.1.3. Rayonnement Thermique

Correspond au transfert de chaleur entre corps solides séparés par un milieu plus ou moins transparent

Ces échanges, qui s'établissent entre les surfaces de corps quelconques disposés en vis à vis, sont représentés par des relations assez complexes où interviennent :

- l'émission du solide qui, s'il est considéré comme un corps noir, n'est fonction que de sa température.
- les états de surface par l'intermédiaire du coefficient d'émissivité  $\varepsilon$  qui caractérise l'écart des surfaces de ces corps à la référence que représente le corps noir.
- des phénomènes de réflexion et d'absorption.
- la disposition de ces surfaces les unes par rapport aux autres, par l'intermédiaire des facteurs de forme.

Et dans ce cas nous avons la relation :

$$\varphi = \sigma \varepsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (\text{II-46})$$

Avec :

$\varphi$  : flux de chaleur transféré à travers la surface S en [W]

$T_p$  :  $T_\infty$  : Température des surfaces en regard en [K]

$\sigma$  : constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67032 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ )

$\varepsilon_p$  : facteur d'émission de la surface S [m<sup>-2</sup>]

### II.3.2. Couplage Electromagnétique et Thermique

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

$$\rho(T) = \rho_0 (1 + \alpha T) \quad (\text{II-47})$$

$\rho_0$  est la résistivité du matériau à 0°C et  $\alpha$  est le coefficient de température du matériau soit  $3.93 \times 10^{-3}$  pour le cuivre et  $4.03 \times 10^{-3}$  pour l'aluminium.

La source d'échauffement dans l'équation de la chaleur provient des pertes par effet de Joule dans le dispositif.

Les deux équations électromagnétique et thermique sont donc fortement couplées. Une méthode itérative est donc nécessaire pour le calcul de la distribution de température [28].

## II.4. Dynamique des Fluides

D'un point de vue physique, le problème d'échange de chaleur par convection est fortement lié à un problème de mécanique des fluides.

Cependant d'un point de vue pratique, il peut être abordé « simplement » par l'intermédiaire des coefficients d'échange dont l'expression fait intervenir :

- les paramètres décrivant la nature de l'écoulement du fluide (vitesse ...),
- les propriétés physiques du fluide (conductivité thermique, viscosité dynamique, capacité calorifique, masse volumique ...) associés le plus souvent sous forme de nombres sans dimension ou caractéristiques (nombres de Nusselt, Prandtl, Reynolds, Grasshof ...)

### II.4.1. Equations de Navier stocks

Les équations qui régissent le mouvement de tout fluide sont :

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

#### II.4.1.1. Formulations vectorielles

##### ➤ Equations de conservation de la quantité de mouvement

En régime stationnaire, et dans le cas d'un fluide Newtonien (contrainte de cisaillement proportionnel au gradient de vitesse), incompressible (densité constante), l'équation de conservation de la quantité de mouvement s'écrit :

$$\rho(\overline{\vec{V} grad \vec{V}}) = \overline{\vec{F}} - \overline{grad p} + \eta \Delta \overline{\vec{V}} + \frac{1}{3} \eta \overline{grad [div(\vec{v})]} \quad (\text{II-48})$$

- **Equation de conservation de la masse ou équation de continuité**

Dans le cas générale, cette équation s'écrite :

$$\frac{d\rho}{dt} + div(\rho \cdot \vec{V}) = 0 \quad (\text{II-49})$$

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

$$div(\vec{V}) = 0 \quad (\text{II-50})$$

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

$$\begin{cases} \text{div} \vec{V} = 0 \\ \rho (\vec{V} \text{ grad}) \vec{V} - \eta \Delta \vec{V} + \text{grad} p = \vec{F} \end{cases} \quad (\text{II-51})$$

#### II.4.1.2. Formulations en coordonnées cartésiennes bidimensionnelles

- **Equations de conservation de la quantité de mouvement**

L'équation de bilan de la quantité de mouvement pour un fluide newtonien visqueux et compressible en régime stationnaire peut s'écrire :

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

En projetant la 2<sup>ème</sup> équation du système en bidimensionnel, elle s'écrit :

$$\begin{cases} \rho \left[ V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} \right] - \eta \left[ \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \right] + \frac{\partial p}{\partial x} = F_x \\ \rho \left[ V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} \right] - \eta \left[ \frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} \right] + \frac{\partial p}{\partial y} = F_y \end{cases}$$

$\tau$  : est le tenseur de contraintes visqueuses

$\rho$  : viscosité dynamique du fluide [Kg/m.s].

$F$  : masse volumique du fluide [Kg/m<sup>3</sup>].

$r$  : densité de forces [N/m<sup>3</sup>] volumique.

$p$  : pression [Pa].

- **Equation de conservation de la masse**

En bidimensionnel, elle s'écrit comme suite :

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0 \quad (\text{II-52})$$

Dans le système devient :

$$\begin{cases} \rho \left[ V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} \right] - \eta \left[ \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \right] + \frac{\partial p}{\partial x} = F_x \\ \rho \left[ V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} \right] - \eta \left[ \frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} \right] + \frac{\partial p}{\partial y} = F_y \\ \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (\text{II-53})$$

C'est un système non linéaire à 3 inconnus : les deux composantes de la vitesse  $V_x$ ,  $V_y$  et la pression  $p$ .

#### II.4.2. Les termes sources

D'après le système (II-53), les termes sources sont représentés par les densités de forces agissant sur le liquide dont il existe 2 types :

- Forces de gravité.
- Forces électriques.

Les forces électriques constituent les termes de couplage entre l'équation électromagnétique et l'équation d'écoulement.

### II.5 Récapitulatif des Equations du Modèle MHD

Les équations fondamentales de la MHD que nous utiliserons par la suite sont constituées des équations électromagnétiques écrites en potentiel vecteur magnétique et scalaire électrique (A-V) et des équations de conservation que nous résumons ci-dessous :

$$\overline{\text{rot}} \left( \frac{1}{\mu} \overline{\text{rot}}(\vec{A}) \right) + \sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overline{\text{grad}}V \right) = \overline{\text{Jex}}$$

$$\rho(\vec{v} \cdot \overline{\text{grad}})\vec{v} = \vec{F} - \overline{\text{grad}}(p) - \frac{2}{3} \overline{\text{grad}}[\eta \text{div}(\vec{v})] + \vec{\tau}$$

$$\text{div}(\rho\vec{v}) = 0$$

$$\rho C_p \vec{v} \cdot \overline{\text{grad}}T = \text{div}(K \overline{\text{grad}}T) + P - Q_r$$

La figure II.3 montre la cohérence physique, la description du couplage entre phénomènes dans un modèle MHD est assurée via des termes sources. Le champ EM (énergie électrique) exercé sur le fluide par la force de Lorentz correspondant à l'énergie mécanique, Le champ EM (énergie électrique) chauffe le fluide par des courants induits (effet joule) correspondant à l'énergie thermique [18].



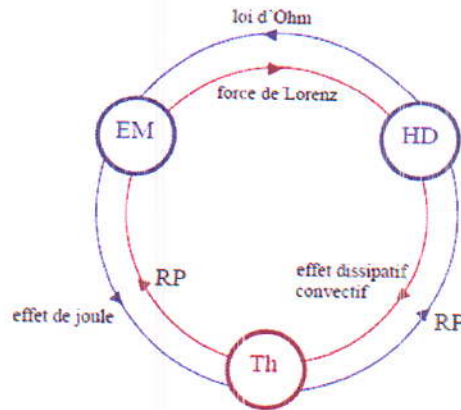


Figure II.3: Schéma du couplage MHD

EM : électromagnétique, HD : hydrodynamique, Th : thermique,

RP : Réintroduire les propriétés du milieu en fonction de  $T$  [K°]

## II .6. Méthodes de Résolution

Sont des méthodes qui résolvent directement les équations différentielles. Le domaine discrétisé sera caractérisé par un certain nombre de points nodaux ou les fonctions inconnues seront évaluées. Avec le développement des ordinateurs ces méthodes trouvent un large champ d'utilisation. Les plus couramment utilisées, nous citons la méthode des différences finies, la méthode des volumes finis et celle des éléments finis a pour objets de ce travail.

### II .6.1. Méthodes analytiques :

C'est la première méthode utilisée, elles consistent à résoudre l'équation différentielle analytiquement avec la technique de séparation des variables. Elle est d'emploi restreint à des géométries simples dans une approche monodimensionnelle ou quelquefois dans des problèmes bidimensionnels et tridimensionnels.

### II .6.2. Les méthodes semi-analytiques :

Ce sont les méthodes semi-analytiques, on distingue la méthode des intégrales de frontières et la méthode des circuits couplés. Elles sont d'une mise en œuvre relativement simple et sont exploitées dans les problèmes de milieux linéaires.

### a) Méthodes des intégrales de frontières :

Elle consiste à discrétiser la frontière du domaine en utilisant le théorème de Green. Elle est limitée à résolution des systèmes linéaires. La limitation de la discrétisation aux frontières du domaine nous donne l'avantage de réduction de place mémoire, surtout pour les systèmes tridimensionnels ou l'air occupe une grande partie du domaine. Cependant, elle a l'inconvénient de conduire à des systèmes qui possèdent des matrices pleines.

### b) Méthodes des circuits couplés (MCC) :

La MCC permet de fournir la solution d'une EDP par une expression intégrale de type déduite de la loi de BIOT et SAVART. Dans ce cas, on associe à la solution, une subdivision de l'inducteur en spires élémentaires.

En appliquant les lois de KIRCHOFF à ces circuits élémentaires, on aboutit à un système algébrique, dont la solution conduit à la distribution des densités de courants. La MCC peut être couplée à une méthode de discrétisation.

## II.6.3. Les méthodes numériques

### a) Méthode des différences finies (MDF)

C'est une méthode qui résout directement l'équation différentielle. Elle consiste à remplacer le milieu continu dans lequel l'équation est applicable, par un réseau de points auxquels s'applique l'équation discrétisée.

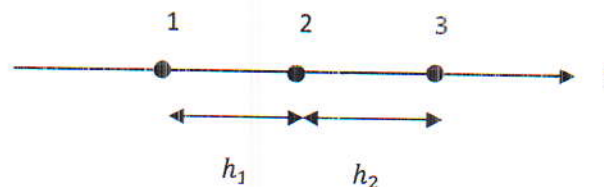


Figure II-4 : Maillage structuré 2D trois nœuds

### b) Méthode des volumes finis

Le domaine est divisé en un nombre finis d'éléments de volume entourant un point  $p$ , l'équation est intégrée sur chaque élément. Dans cette méthode contrairement à la méthode des différences finies, la variation linéaire de l'inconnu peut être remplacé par sous domaine en fonction de la grandeur.

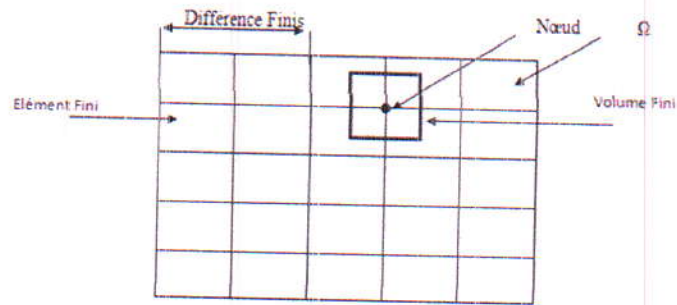


Figure II-5 : Maillage du domaine d'étude en volume fini.

### c) Méthode des Éléments Finis (MEF)

La résolution analytique des équations de Maxwell n'est possible que dans certaines configurations simples. Dans la majorité des cas, il convient de faire appel à des méthodes de résolutions numériques comme celle des éléments finis (MEF) [25-27].

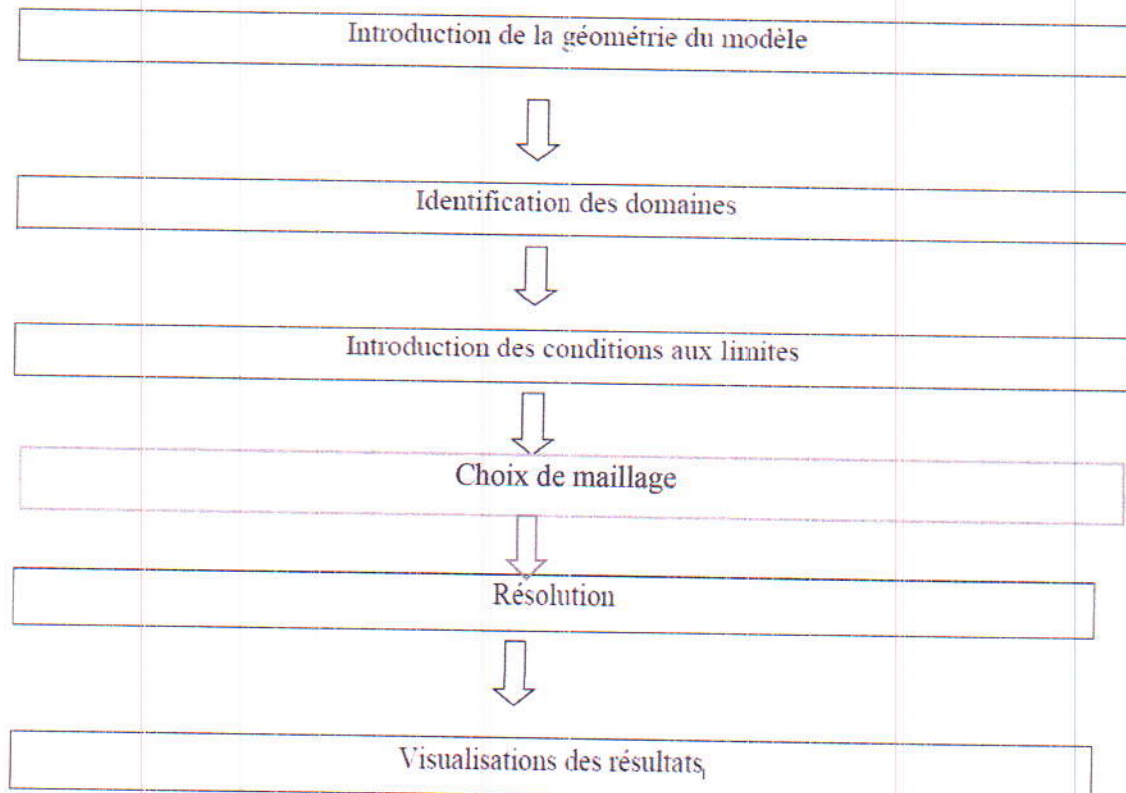
La méthode des éléments finis (MEF) est l'une des méthodes les plus employées aujourd'hui pour résoudre des équations aux dérivées partielles, notamment les équations de Maxwell qui régissent les phénomènes électromagnétiques [26]. Elle a d'abord été utilisée pour résoudre des équations d'élasticité et de mécanique des structures et adaptée plus tard à l'électromagnétisme. Elle a fait son apparition dans les années 70, après la MDF. Néanmoins, son histoire remonte à l'année 1943. La MEF est une méthode générale qui s'applique à la majorité des problèmes rencontrés dans la pratique : problèmes stationnaires ou non stationnaires, linéaires ou non linéaires, définis dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions. En plus, elle s'adapte bien aux milieux hétérogènes. Elle consiste à approcher les variables inconnues par un polynôme de degré fini aux nœuds du maillage. Les parties élémentaires sont des polygones. Les géométries conventionnelles sont mieux décrites par ce maillage aux éléments finis qu'aux différences finies. En effet, la variété des formes d'éléments finis (tétraèdres, hexaèdres, prismes, par exemple en 3D) permet de mailler les régions avec une densité variable. Les conditions aux limites sont prises en compte aisément. Enfin, la méthode est décrite par une théorie mathématique très riche, qui permet de conserver les propriétés des opérateurs mathématiques. Néanmoins, cette méthode exige un traitement particulier des équations, qui sont transformées à l'aide d'une formulation intégrale, puis discrétisées pour aboutir à un système d'équations algébriques. La précision du calcul est liée à la finesse du maillage et au degré de ces polynômes. Leurs coefficients ne dépendent que de la géométrie et de sa discrétisation [29].

➤ *Étapes de la méthode des éléments finis*

C'est la méthode la plus utilisée vu sa généralisation et sa capacité de résoudre les problèmes les plus complexes, le système d'équations algébriques est obtenu en appliquant la méthode des résidus pondérés, ou la méthode variationnelle, la résolution du système permet d'obtenir la solution du problème original. La méthode des éléments finis peut être résumée dans les étapes suivantes :

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

Actuellement, il existe différents logiciels qui utilisent cette méthode comme le Femlab , Maxwell, Flux2D et FEMM. Dans la suite de ce travail, nous avons utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics version 3.5. Les étapes de résolution peuvent être résumées selon l'organigramme montré dans la figure :



**Figure II-6** : Diagramme de différentes étapes de résolution dans Comsol Multiphysics

## 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.

Nous avons détaillé dans ce chapitre à la fois les différents modèles (l'électromagnétisme, le modèle dynamique et thermique de transfert de chaleur) décrivant le modèle MHD, et les différentes méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles de ces phénomènes, en tenant compte leurs couplages. Un modèle numérique élément fini est rappelé pour résoudre le modèle mathématique utilise une méthode directe. Cependant, La résolution de ces phénomènes est possible analytiquement pour des certains cas simples, mais ce n'est pas générale (complexité de la géométrie, couplage...). L'utilisation de la méthode des éléments finis (MEF) sera donc systématiquement employée est préférable dans notre travail (géométries et des phénomènes physiques assez complexe en fournissant des résultats de calcul EF avec une grande fiabilité). En effet, la modélisation par élément fins a beaucoup évaluée ces dernières années surtout grâce à l'application de nouvelles technologies de développement de logiciels tels que : Flux2D, Flux3D, Flux-Expert, Maxwell, COMSOL-Multiphysiques. La disponibilité de ce dernier, nous a favorisé de l'exploiter, dans lequel, on trouve les différents modules physiques (électromagnétique, thermique, écoulement) pour modéliser les phénomènes multi-physiques pour nos différentes applications (la MHD dans transformateurs) envisagées dans le prochain chapitre.

# CHAPITRE III

## *Applications*

## I. Introduction

Ce dernier chapitre est consacré à quelques applications qui vont nous permettre de valider et implémenter les modèles mathématiques MHD développés résolus par la méthode des éléments finis décrits dans le chapitre précédent afin de donner une appréciation sur le comportement des phénomènes multiphysiques dans deux genres des transformateurs très utilisés dans les installations électriques lors de leurs refroidissements.

La première application est consacrée l'étude des phénomènes thermodynamique d'origine électromagnétique d'une phase d'un transformateur de puissance THT/HT à colonne ; largement utilisé dans les postes d'interconnexion et de transformation ; refroidi par l'huile cité dans le premier chapitre en utilisant le modèle numérique des éléments finis du couplage fort. La modélisation thermodynamique d'un transformateur à noyau torique cuirassé très utilisé dans les installations électriques caractérisé par très bon rendement (moins de dissipation) son sera l'objet de la deuxième application. Ce transformateur alimenté en basse tension (BT) refroidi par l'air forcé, la variation de la densité de masse en fonction de la température est prise en considération. L'ensemble de nos résultats sont discutés et interprétés en détail, obtenus par des modèles axisymétriques en couplage fort à l'aide d'un logiciel commercial Comsol Multiphysiques basé sur la méthode des éléments finis.

### II.1 Modélisation d'un Transformateur de Puissance THT/HT

Le modèle géométrique décrit dans cette application est un transformateur de puissance colonnes triphasés figure (III.1) refroidi par l'huile. Les enroulements très haute tension (THT) sont connectés en triangle et les enroulements moyens tension (HT) connectés en étoile. Cette application est dédiée à la modélisation d'une phase d'un transformateur de puissance (THT/HT) représentée sur la figure (III.2 et III.3) a les caractéristiques remplies dans le tableau ci-dessous car les prénommes sont similaires dans les deux autres et pour des raisons aussi de l'axe de révolution dans la phase considérée et en terme d'optimisation de temps de calcul et de l'espace mémoire et d'autre problèmes numériques (divergence) on a pris un modèle axisymétrique comme le montre la figure (III.2). Ensuite, on a pris une partie de bobinage immergée dans une cuve refroidie par huile afin d'étudier les phénomènes couplés MHD pour avoir modélisé son mécanisme de refroidissement.



Caractéristiques	Valeur	Unité
Puissance apparente	120	MVA
Fréquence	50	Hz
Tension nominal de l'enroulement THT ( $U_n$ )	220	kV
Tension nominal de l'enroulement HT ( $U_n$ )	63	kV

Tableau III.1 : Caractéristiques du transformateur THT/HT

a. Dimensionnements géométriques du transformateur THT/HT

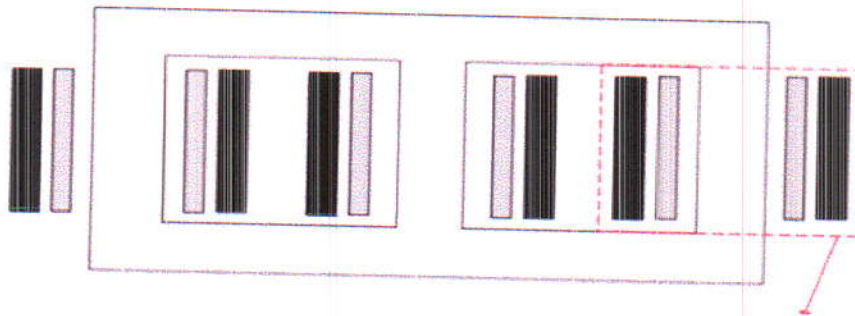


Figure III.1 : Transformateur de puissance triphasé

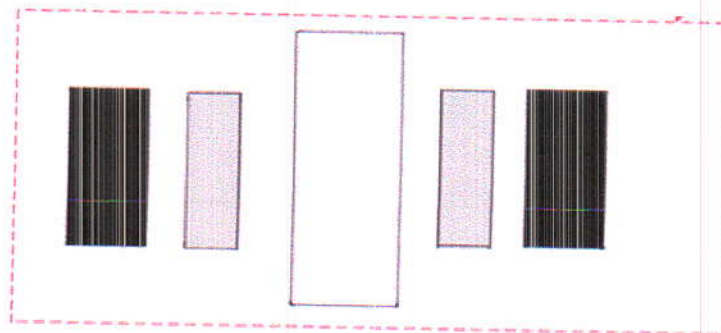


Figure III.2 : Phase du transformateur de puissance



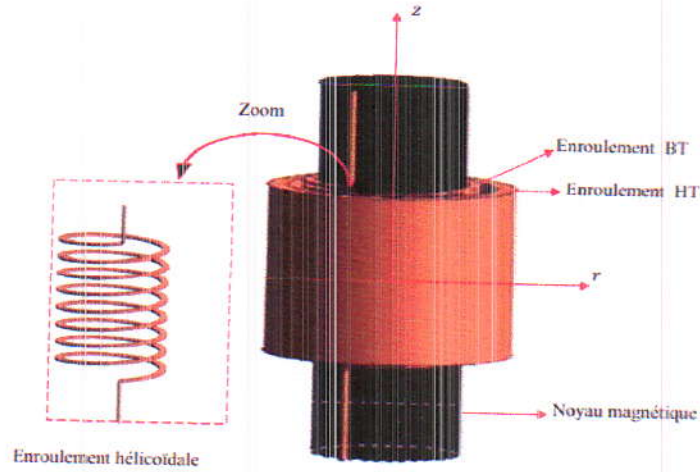


Figure III.3 : Modèle d'une phase en trois dimensions

En raison de l'axisymétrie du dispositif par rapport à l'axe de révolution ( $r=0, z$ ) avec certaines hypothèses simplificatrices, il suffit de prendre en compte la moitié du système qui devient comme le montre la figure suivante :

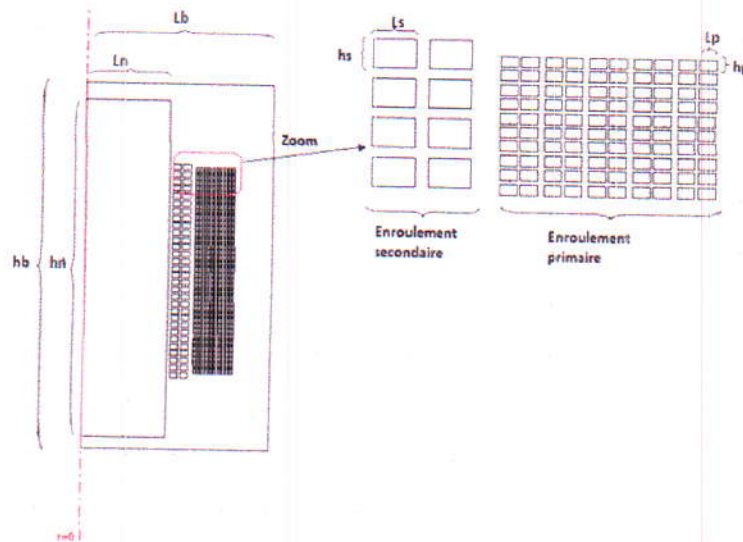


Figure III.4 : Modèle axisymétrique d'une phase de transformateur THT/HT

Caractéristiques géométriques	Valeur	Unité
Hauteur de la boîte d'air (hb)	3.5	m
largeur de la boîte d'air (Lb)	2	m
Hauteur du noyau (hn)	3.2	m
largeur du noyau (Ln)	0.9	m

Hauteur du conducteur secondaire (hs)	4	mm
Largeur du conducteur secondaire (Ls)	8	mm
Hauteur du conducteur primaire (hp)	1	mm
Largeur du conducteur primaire (Lp)	3	mm

Tableau III.2 : Dimensions géométriques de modèle

b. Caractéristiques physiques

Milieu physique	Caractéristique	Conductivité électrique	Perméabilité magnétique
	Huile (Borak22)	$2.699 \cdot 10^{-8} [S/m]$	$\mu = \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} [H/m]$
	Enroulement	$5.9 \cdot 10^{-7} [S/m]$	$\mu = \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}, \mu_r = 1$
	Noyau	$10^6 [S/m]$	$\mu_r = 1, \mu_r > 1, \mu = \mu_r \mu_0$

Tableau III.3 : Caractéristiques physiques du transformateur

c. Discrétisation de la structure

Cette figure (III.3) représente la discrétisation en éléments finis du modèle axisymétrique cité ci-dessus.

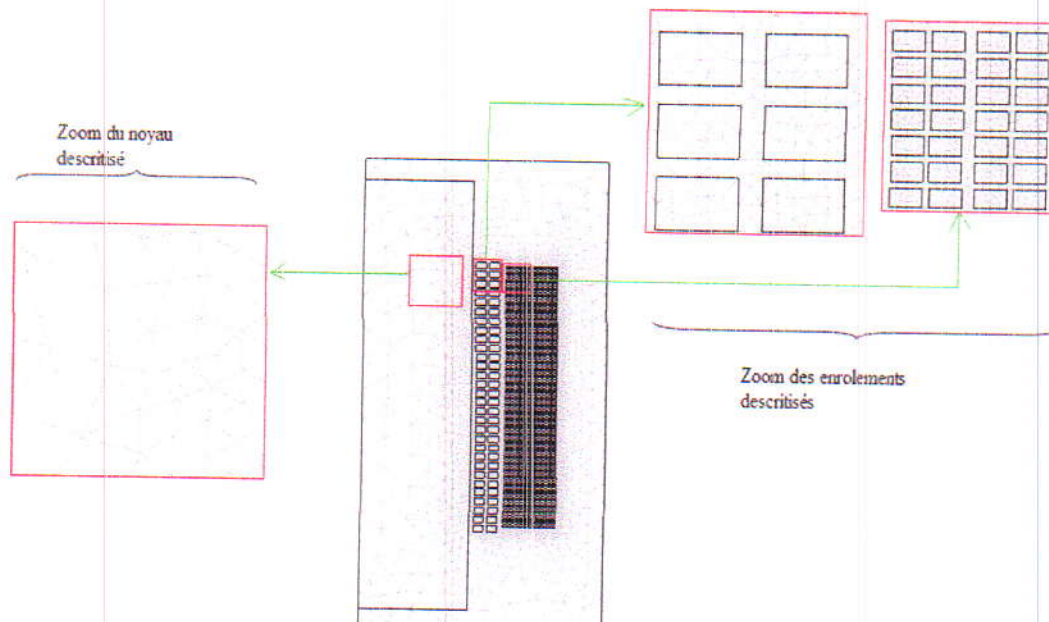


Figure III.5 : Discrétisation par élément finis (maillage utilisé)

### d. Résultats et Interprétations

#### ➤ Etude électromagnétique

Cette étude permet de donner une appréciation sur les grandeurs électromagnétiques précédemment décrites à partir du modèle en potentiel vecteur magnétique et scalaire électrique ( $A-V$ ) développé au cours de chapitre précédent. Après calcul, nous avons obtenu les résultats pour les grandeurs électromagnétiques.

Les figures III.7 et III.8 montrent successivement le potentiel vecteur magnétique  $A$  et les lignes isovaleurs du champ électrique ( $E$ ) qui se ferment sur le bobinage, et on voit bien évident que les pics de maximums se trouvent en face les bobines (source d'excitation), et on voit aussi que le champ électrique est l'image du potentiel vecteur magnétique en allure.

Les figures (III.9 et III.10) représentent le champ magnétique qui est important dans les extrémités de noyau magnétique que les lignes isovaleurs sont ouvertes, par contre la densité de flux magnétique est plus concentrée dans le noyau ferromagnétique en les enroulements qui vont traverses le circuit magnétique a une grande amplitude par rapport à l'extérieur. La puissance induite par effet de Joule est représentée sur la figure (III.11) et c'est le terme source responsable sur chauffage dans le transformateur qui a concentration de sa répartition notable dans le circuit bobinage et plus important dans le circuit secondaire car ce transformateur abaisseur de tension. La figure (III.12) montre la répartition des forces de Lorenz d'origine magnétique. Cette densité est concentrée dans le secondaire qui favorise beaucoup plus les courants induits c'est le terme de source agit sur le fluide.

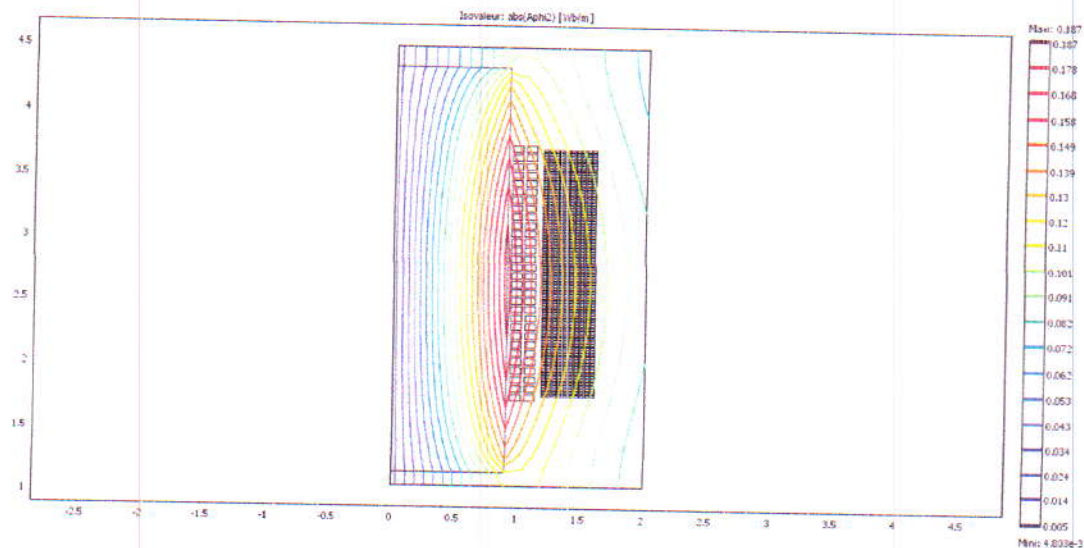


Figure III.7 : Norme de potentiel magnétique  $A$  [Wb/m]

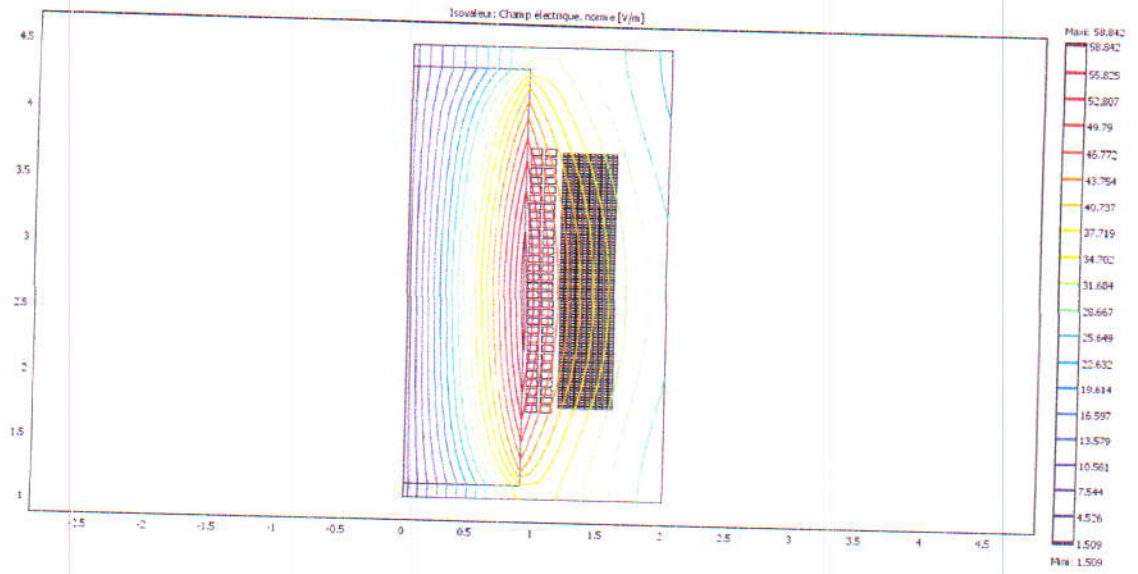


Figure III.8 : Isovaleurs de champ électrique [V/m]

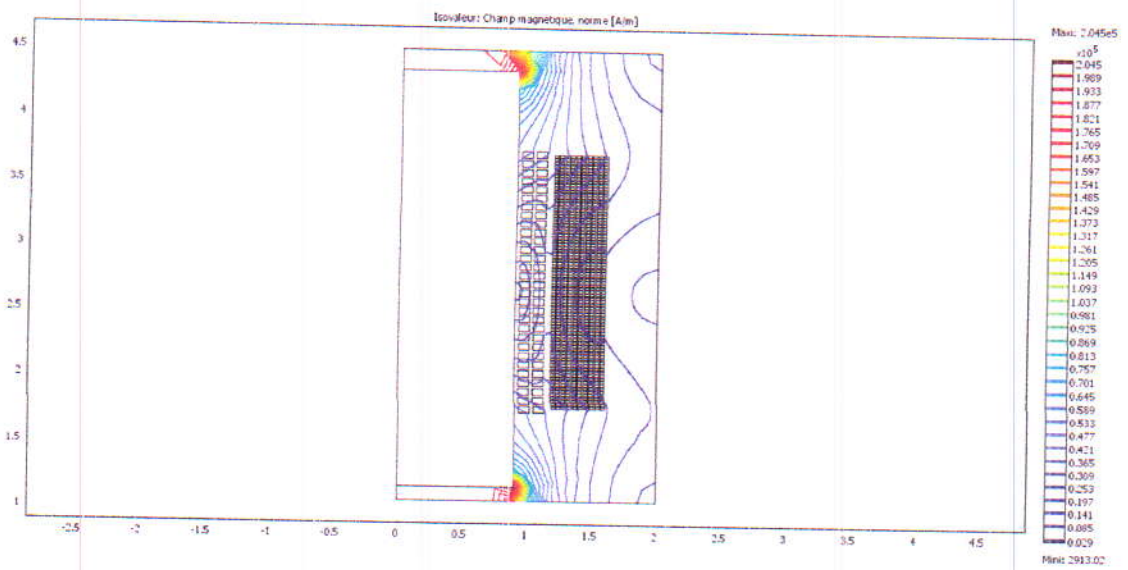


Figure III.9 : Isovaleurs de champ magnétique [A/m]

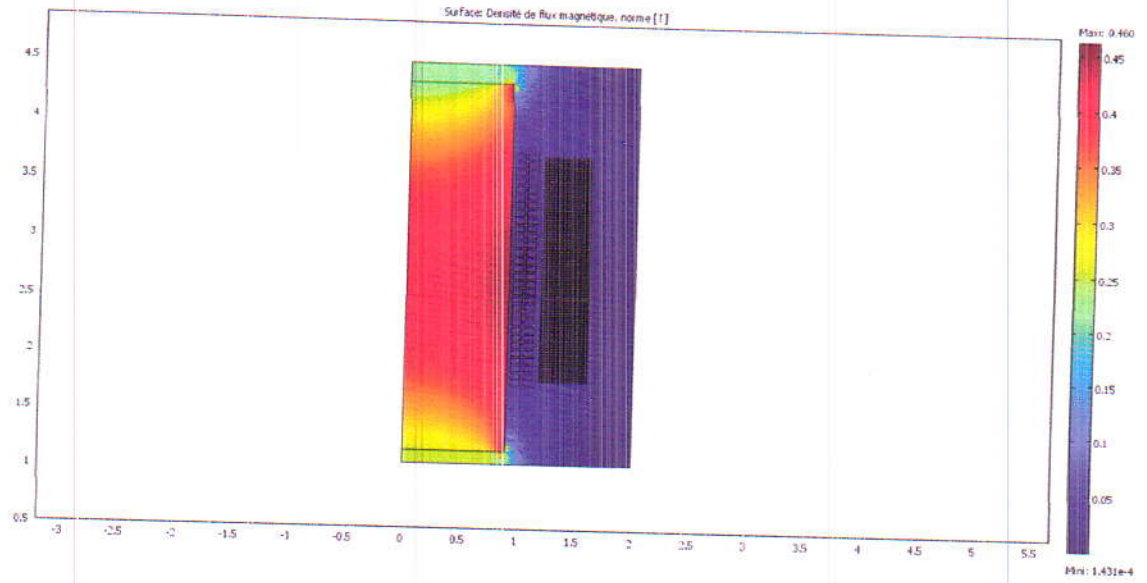


Figure III.10 : Densité de flux magnétique [T]

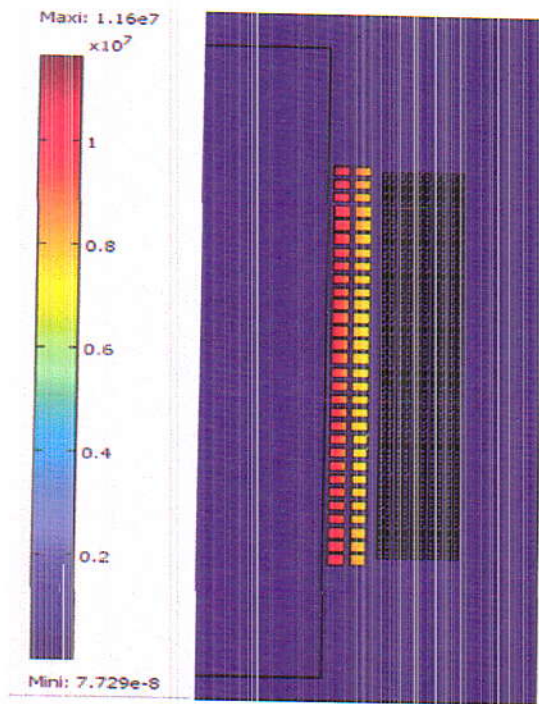


Figure III.11 : Densité de puissance induite [W /m<sup>3</sup>]

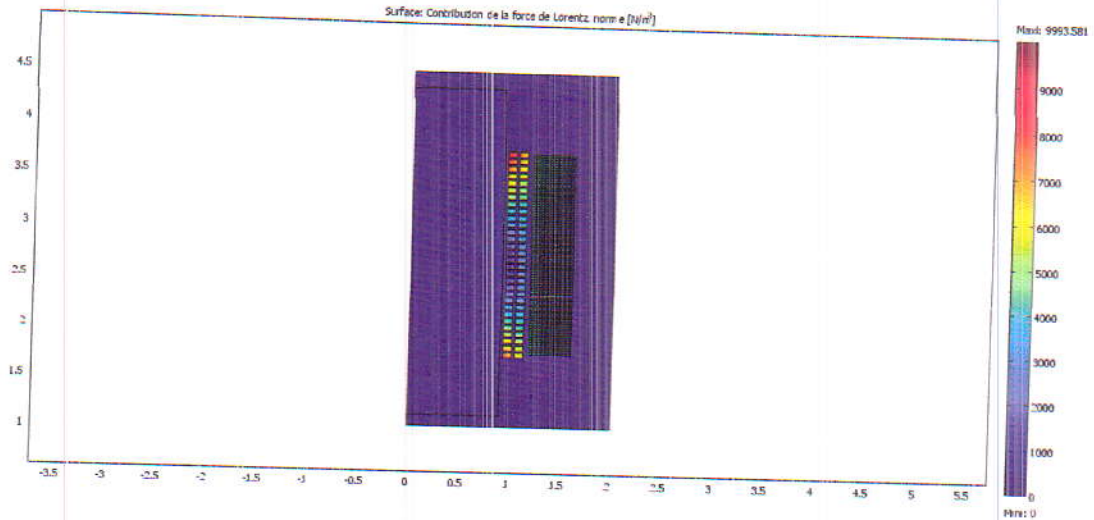


Figure III.11 : Densité de force Lorentz induite [N /m<sup>3</sup>]

## II.2 Etude MHD de Refroidissement par Huile d'un Bobinage d'une Phase du Transformateur

### II.2.1 Représentation de la géométrie de bobinage

Pour des raisons numériques (espace mémoire insuffisant et problème de divergence) de l'ordinateur qu'on utilise, nous allons modéliser seulement une partie de bobinage du transformateur de puissance THT/HT cité auparavant.

Cette application est consacrée à l'étude magnétohydrodynamique d'une phase d'un transformateur de puissance alimenté en courant électrique immergée dans une cuve d'huile (la borack 22) au cours du remplissage de cette dernière avec une vitesse afin de refroidir le bobinage comme le montre la figure ci-dessous (figure III.11) :

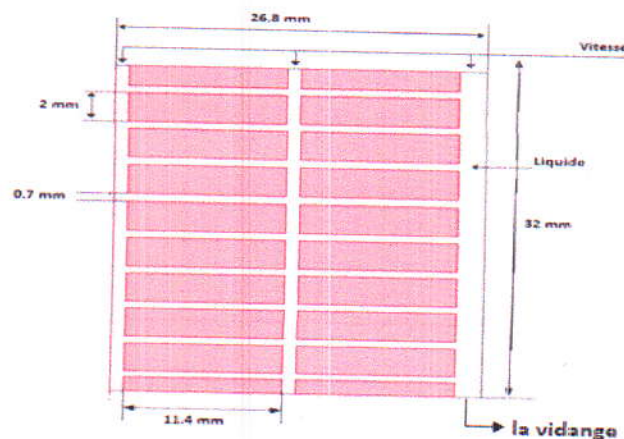


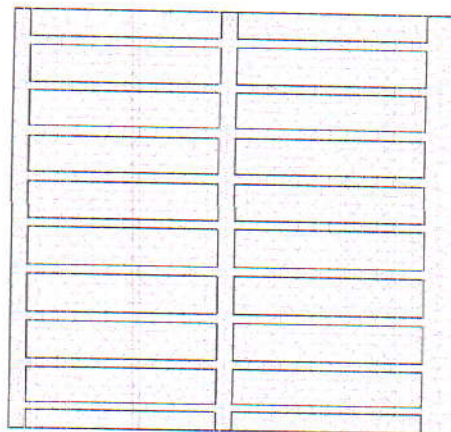
Figure III.11 : Bobinage d'un transformateur immergé dans une cuve d'huile

Les propriétés physiques (thermiques et électriques) pour cette application sont remplies dans le tableau suivant :

Quantité	Valeur	Unités
Densité du courant surface	30000	A/m
Conductivité thermique (K) du fluide	0.125	W/(m.k)
Conductivité thermique (K) du solide	383	W/(m.k)
Conductivité électrique du solide	$5.9 \cdot 10^7$	S/m
Conductivité électrique du fluide	$2.699 \cdot 10^{-8}$	S/m
Conductivité électrique du fluide	$2.699 \cdot 10^{-8}$	S/m
Capacité calorifique a pression constante (Cp)	385	J/(kg.k)
Densité ( $\rho$ ) du solide	8700	Kg/m <sup>3</sup>

**Tableau III.4 :** Propriétés thermiques et physiques pour l'application

Après introduction des données géométriques et physiques ainsi que les conditions aux limites et par exploitation d'un mailleur automatique du Comsol, on a obtenu le maillage ci-dessous :



**Figure III.12 :** Maillage du modèle utilisé

## II.2.2 Résultats et Discussions

Dans cette partie on va présenter l'ensemble des résultats obtenus d'un modèle MHD pour les différents phénomènes interveniens.

### a) Etude électromagnétique

L'ensemble des figures (III.13-III.17) montrent successivement les différentes grandeurs électromagnétiques tels que, l'isovaleurs potentiel vecteur magnétique, champ magnétique, la densité des courants induits et la puissance induite ainsi la contribution des forces de Lorenz.

On remarque que, le potentiel vecteur magnétique, la densité des courants induits et la densité de puissance induite sont plus concentrées à l'intérieur de l'ensemble des galettes vers le milieu de bobinage et pratiquement exclues dans le diélectrique.

Les figures (III.16, III.17) représentent la contribution des termes de source viennent d'électromagnétique (puissance induite et force de Lorenz ou d'origine magnétique) couplés aux autres phénomènes (thermique et écoulement).

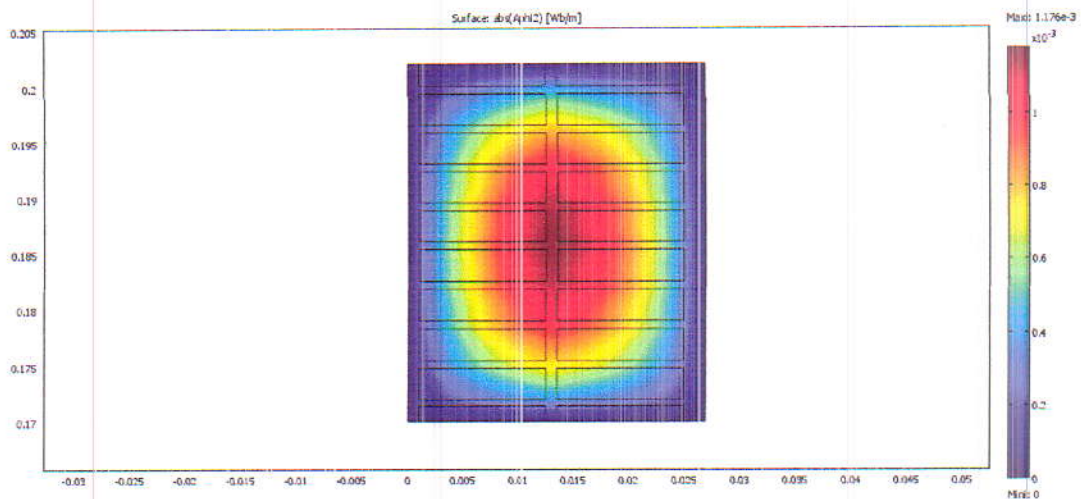


Figure III.13 : Potentiel magnétique  $A_{\phi}$  [Wb/m]



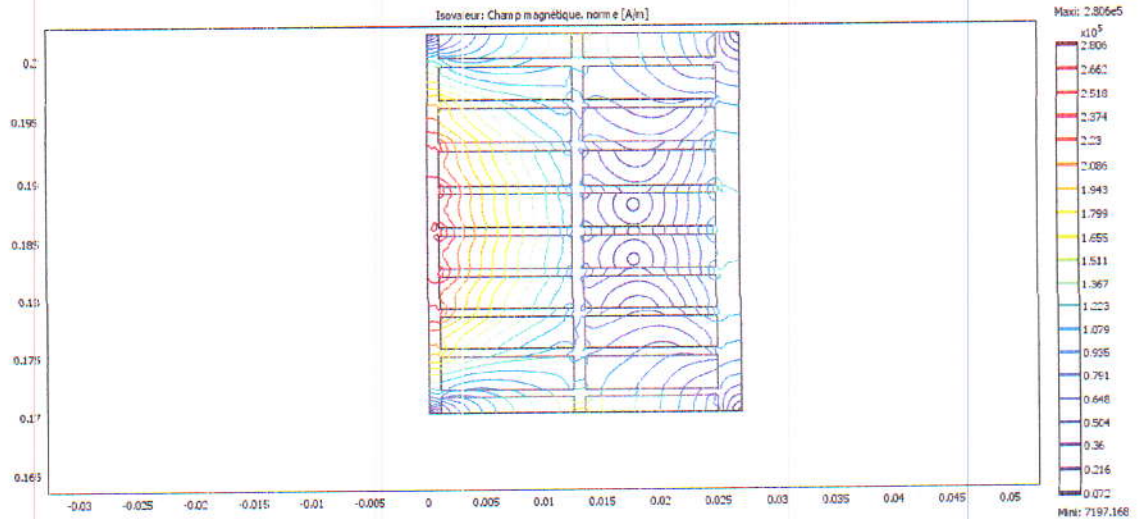


Figure III.14 : Isovaleurs champ magnétique [A/m]

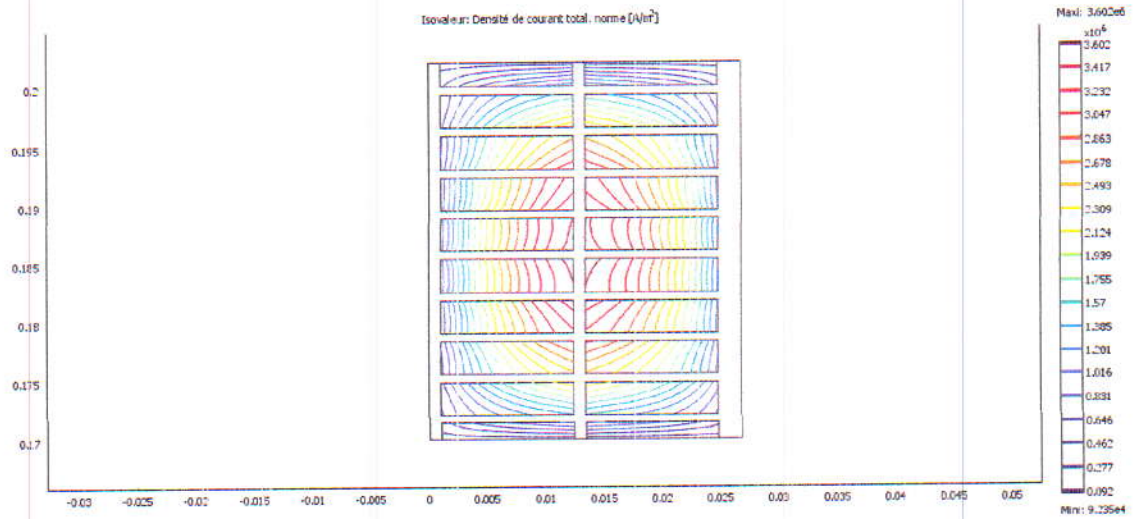


Figure III.15 : Densité de courant total [A/m<sup>2</sup>]

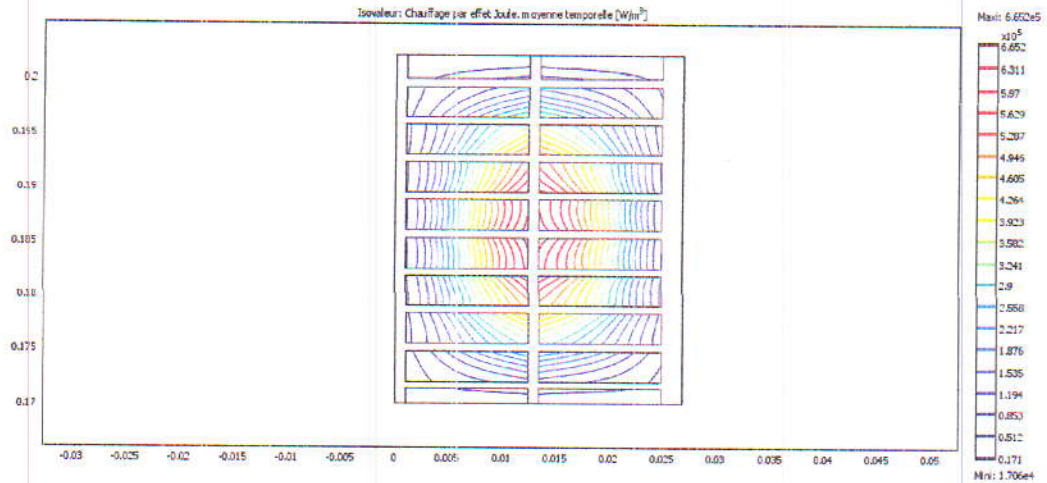


Figure III.16 : Densité de puissance induite [W/m<sup>3</sup>]

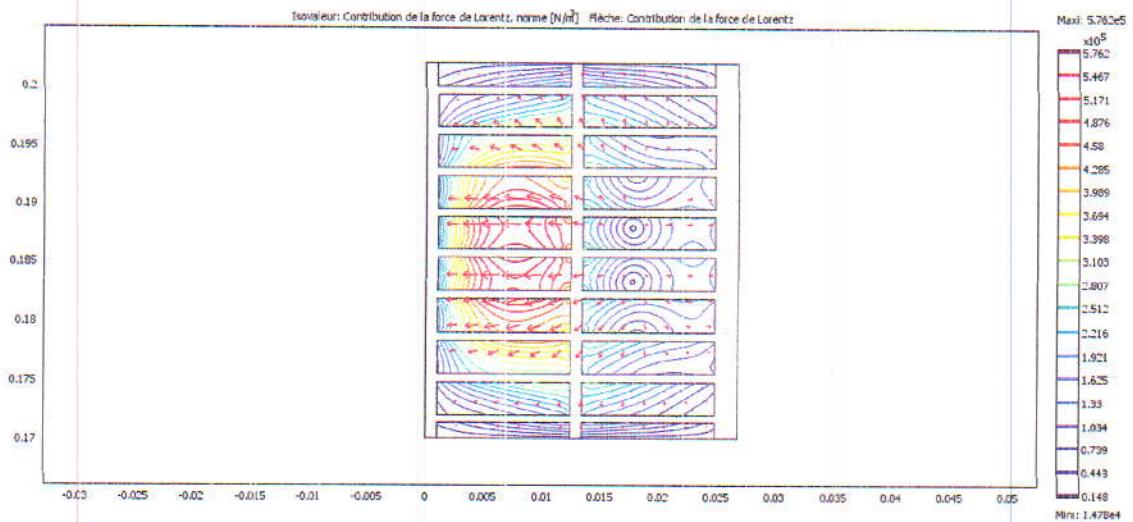


Figure III.17 : Contribution de la force de Lorentz [N/m<sup>3</sup>]

**b) Etude thermique**

La figure III.18 représente la distribution de la température au sein de la phase du transformateur ne dépasse guère la température autorisée par les constructeurs (autour de 350°K) qui favorise l'utilisation de la bobine 22 dans cette technologie. On remarque aussi, que sa distribution est moins faible aux niveaux des premières galettes et de plus en plus concentrée vers les dernières galettes par rapport aux entrées de diélectrique, cette croissance est due au flux thermique convectif représentée sur la figure III.20. Cet effet de convection est

montré sur la figure III.19 par comparaison qui représente la répartition de la température sans vitesse d'entrée de fluide. Nous constatons une température maximale atteinte  $457^{\circ}\text{K}$  et une des valeurs importante sur les parois dus à l'absence de flux convectif.

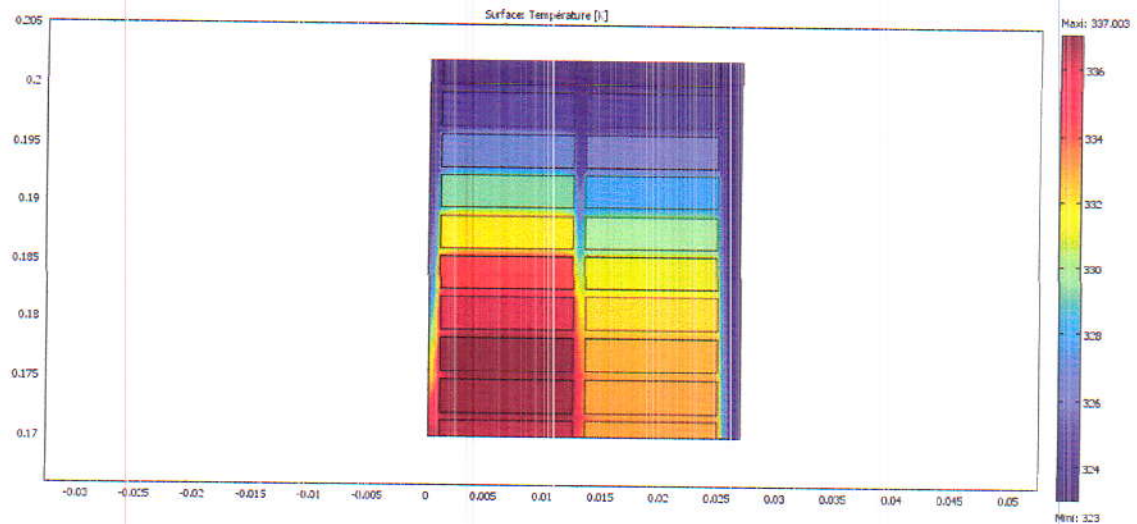


Figure III.18 : Répartition de la température [ $^{\circ}\text{K}$ ]

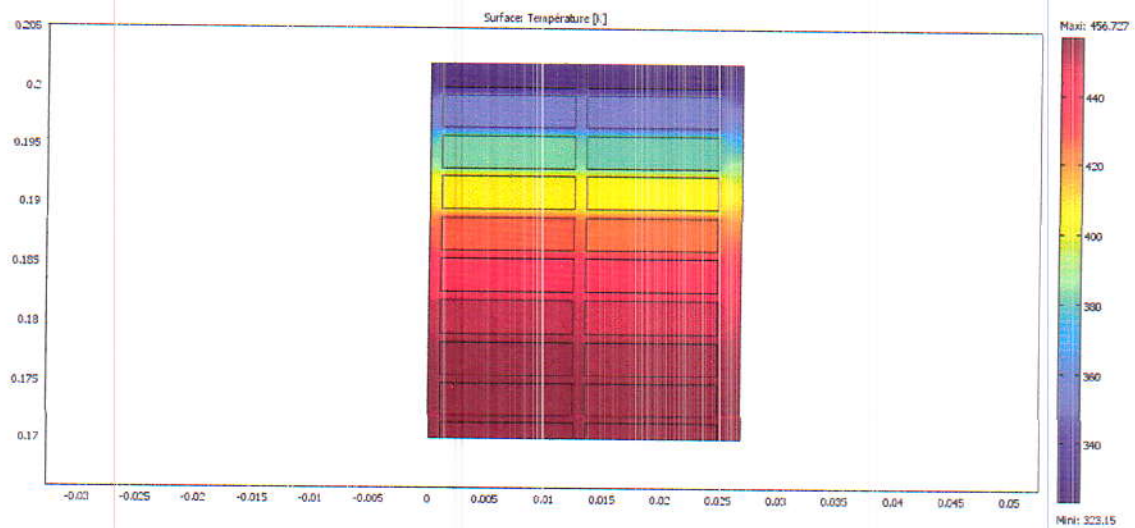


Figure III.19 : Répartition de la température sans d'entrée de fluide [ $^{\circ}\text{K}$ ]

### c) Etude d'écoulement

Ce flux est emporté par un champ de vitesse de l'entrée vers le bas et canalisé à la sortie de la vidange comme le montre la figure III.20. La figure III.21 montre la répartition

des vitesses d'écoulement entre les entrées d'huile de l'extrémité haute et ça sortie à l'extrémité basse. En remarquant que la contribution du flux conductif (III.22) est moins importante que celui de convection due à la vitesse de fluide.

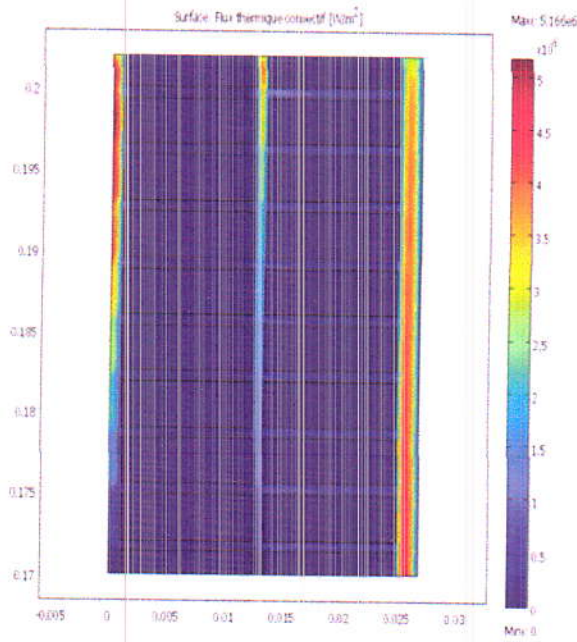


Figure III.20 : Flux thermique convectif [ $W/m^2$ ]

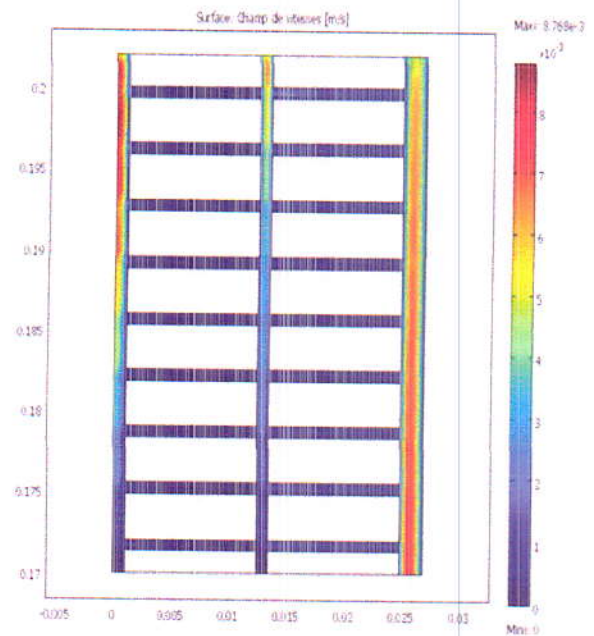


Figure III.21 : Champ de Vitesse [m/s]

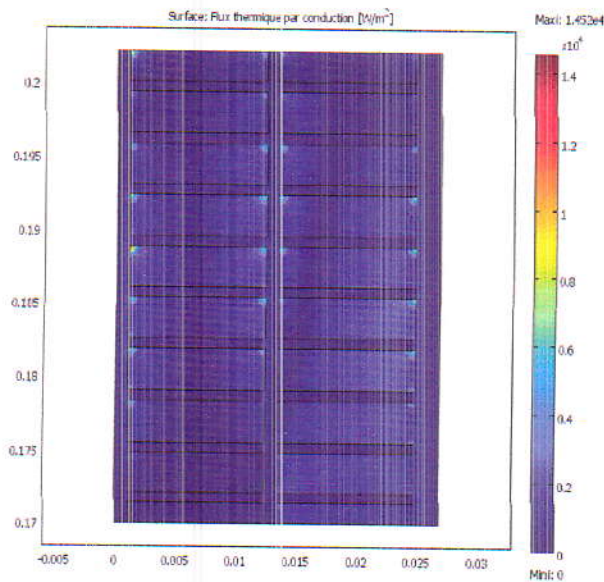


Figure III.22 : Flux thermique par conduction

### II.2.3 Application N 2 : Etude de refroidissement d'un transformateur à noyau torique refroidi par l'air

Par construction, le transformateur torique est proche de la définition théorique idéale. De ce fait, les performances sont excellentes : dimensions et poids réduits (près de la moitié d'un transformateur conventionnel), bruit et champ de fuites magnétiques très faibles. Ces excellentes caractéristiques font de ce type de transformateur le composant idéal pour les alimentations et équipements compacts. Les techniques de production permettent aujourd'hui de réaliser ces transformateurs toriques à des prix équivalents, voire meilleurs, que les transformateurs conventionnels. Les pertes fer sont très faibles (valeur typique 1,1 W/kg) : le courant magnétisant et donc l'échauffement sont réduits. La densité de flux est plus élevée parce que le flux magnétique est orienté dans la direction de la tôle spiralée à grains orientés, d'où une considérable réduction du poids et du volume du noyau. Tous les enroulements sont répartis de façon symétrique sur la totalité du noyau, les longueurs de fil en sont plus courtes. Une meilleure densité de courant dans les enroulements est permise, car ils utilisent la totalité du noyau comme surface d'échange thermique. L'accroissement de température à pleine charge en régime permanent peut atteindre 65° au-dessus de l'ambiante, la température du transformateur ne devant pas dépasser 105° (maximum admissible par les isolants PVC). Donc la plupart des cas est soutenu d'un système de refroidissement (ventilation) à air forcée. Une photo du dispositif utilisé pour l'identification est présentée à la figure III.23 avec en (a) le dispositif tel qu'utilisé et en (b) le dispositif ouvert pour montrer le bobinage.

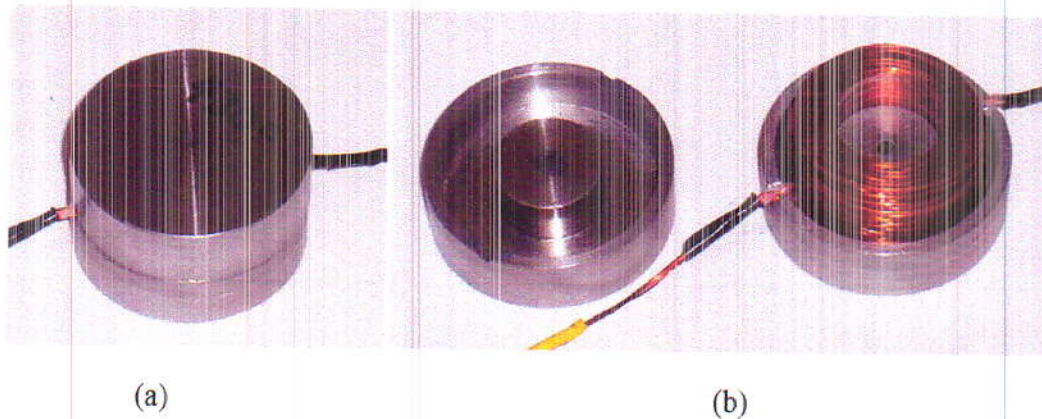


Figure III.23 : Photo d'un transformateur torique [ref]

#### a. Représentation du géométrique et physique du transformateur à noyau torique

La figure suivante (III.24) représente la géométrie à modéliser en 3D d'un transformateur cuirassé à noyau torique qui contient : circuit magnétique (ferrite tore),

un isolant, une bobine (cuivre) et une boîte qui englobe l'ensemble (quartz). Ce modèle est basé sur un tore circulaire, une sorte d'anneau. La bobine est enroulée selon le trou de l'anneau et autour de la zone extérieure. Une bobine idéale est distribuée de façon régulière sur la circonférence de l'anneau. Cette géométrie répartit le champ magnétique selon une boucle complète et conserve ainsi la plus grande part du champ au sein du matériau du noyau.

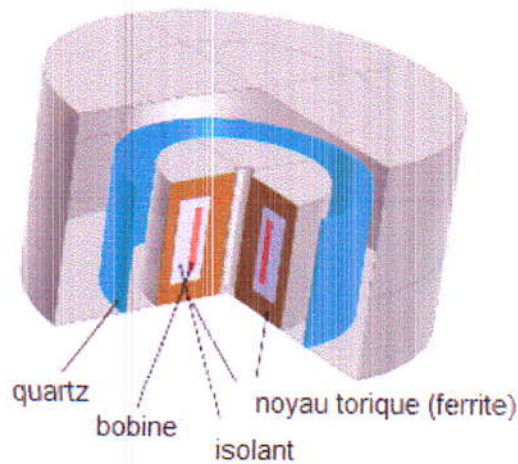


Figure III.24 : Modèle géométrique en trois dimensions

La modélisation des phénomènes dans les dispositifs présentant une symétrie de révolution par rapport son axe, permet de ramener un modèle tridimensionnel à un modèle bidimensionnel. Les résultats de modélisation que nous allons présenter ont été obtenus à l'aide d'un modèle du couplage fort éléments finis 2D-MHD axisymétrique comme le montre la figure III.25.

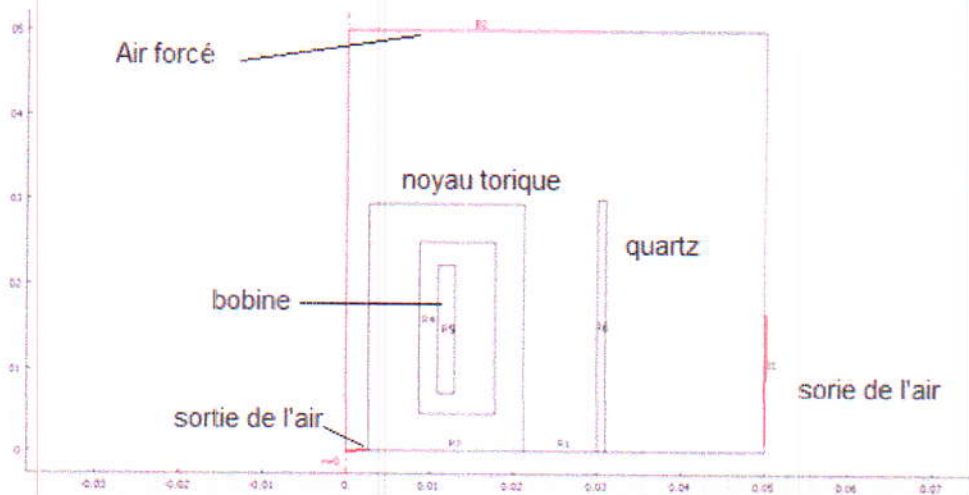


Figure III.25 : Géométrie de modèle utilisé

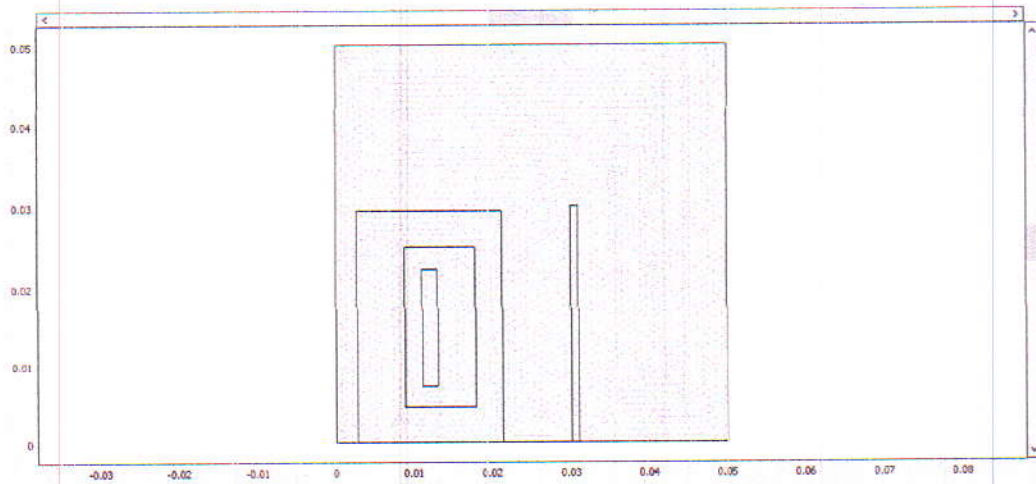


Figure III.26 : Maillage de modèle utilisé

### b. Etude thermodynamique

Cette partie est consacrée beaucoup plus à l'étude MHD de refroidissement à air forcé. Nous commençons à étudier l'effet de la vitesse de l'air sur le refroidissement, par comparaison entre les deux figures (III.27) et (III.28) représentent la distribution de la température sans vitesse d'entrée d'air et avec air forcé. On remarque l'effet convectif sur diminution de l'amplitude et la répartition de température dans les régions où il y a la circulation d'air importante comme le montre la figure (III.29) qui augmente le flux convectif dans ces régions comme le montre la figure (III.30) montrent clairement aussi un mouvement recirculatoire au niveau de la sortie d'air dû à l'issue fermée en bas. Par contre le flux par conduction (figure III.31) est important dans le circuit magnétique.

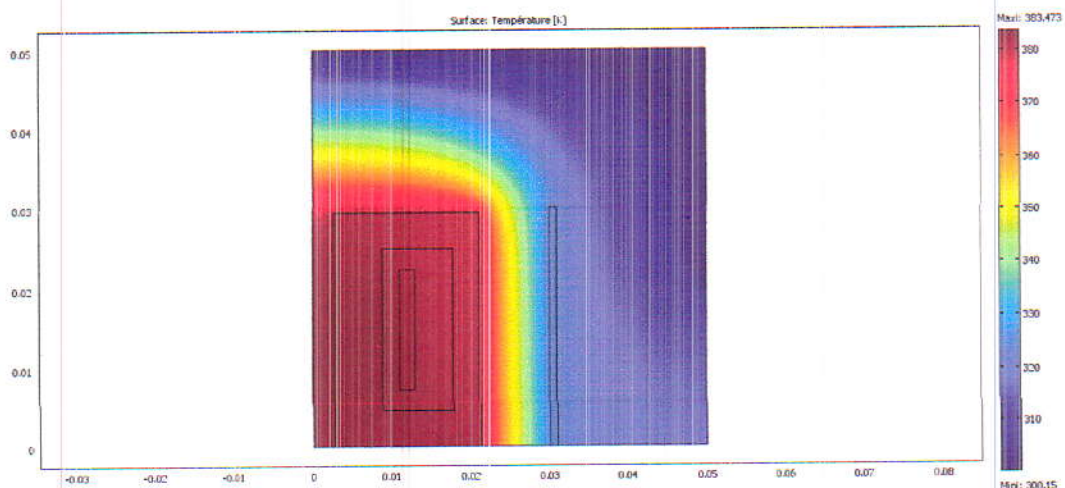


Figure III.27 : Répartition de la température sans vitesse d'entrée de fluide [ $^{\circ}\text{K}$ ]

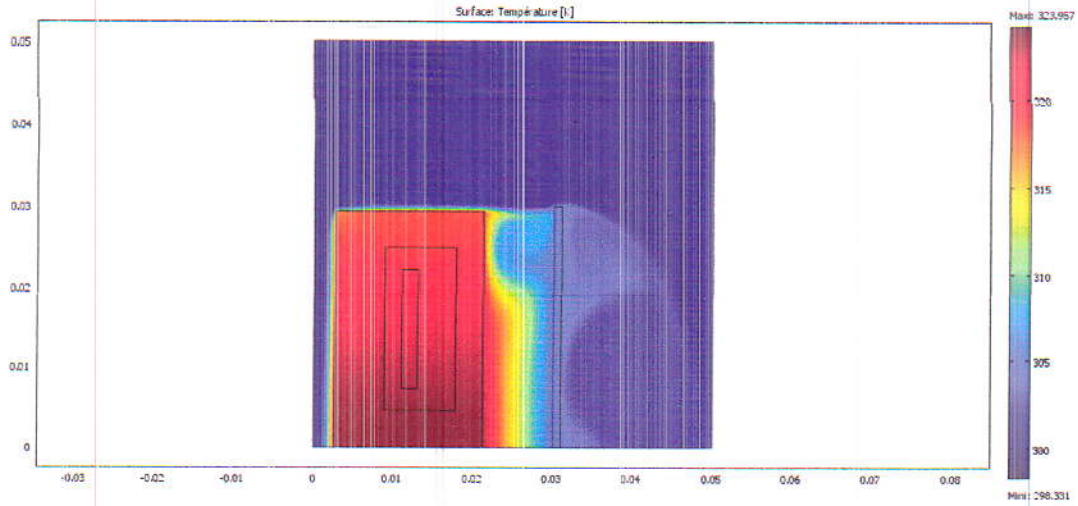


Figure III.28: Distribution de la température avec air forée [K]

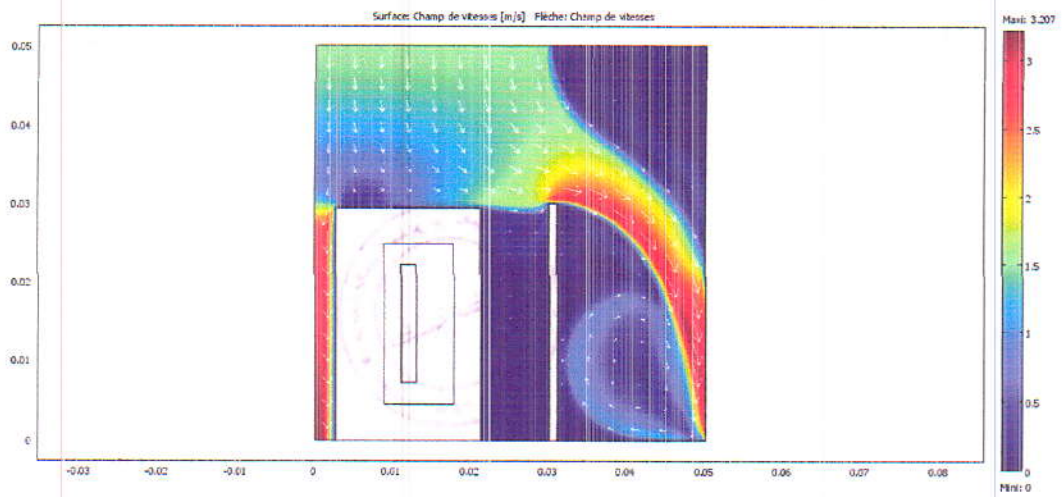


Figure III.29: Champ de vitesse [m/s]

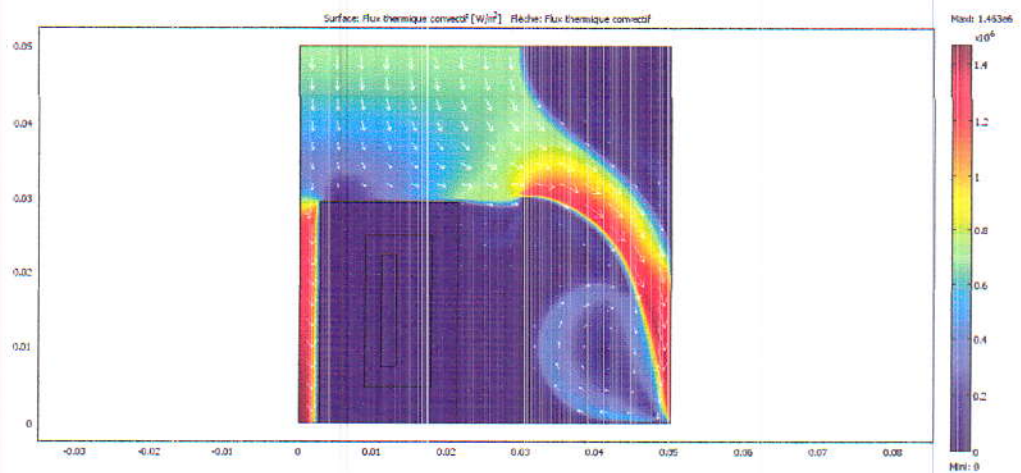


Figure III.30 : Flux thermique convectif [W/m<sup>2</sup>]



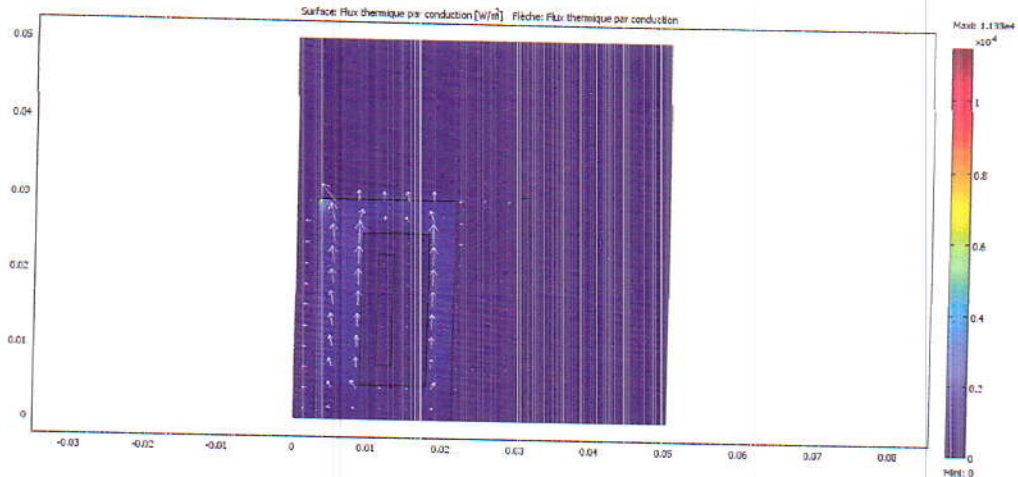


Figure III.31 : Flux thermique par conduction [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

### Conclusion

Dans ce chapitre on a adapté un modèle numérique élément finis du couplage fort basé certes sur des hypothèses de calcul simplificatrices tel que, la modélisation des phénomènes dans les dispositifs présentant une symétrie de révolution par rapport son axe, permet de ramener un modèle tridimensionnel à un modèle bidimensionnel. Ce modèle MHD axisymétrique met en évidence l'évolution des différentes grandeurs électromagnétiques, thermique et écoulement au sein des transformateurs refroidis. On a retrouvé certains aspects connus de l'induction, chauffage par effet de Joule, l'effet de la vitesse des fluides de refroidissement sur la diminution de température et l'évacuation de cette dernière par convection. Ces résultats sont particulièrement importants pour des applications à l'échelle industrielle.

L'objectif de modélisation est atteint, qui est d'ailleurs le but de mémoire, est de développer un modèle mathématique de la MHD décrivant l'interaction entre le champ électromagnétique et un fluide en mouvement, dans la limite de l'écoulement laminaire.

-Le modèle est basé sur une description mathématique de la mécanique des fluides et la physique des milieux continus dérivées des principes de l'électromagnétisme et de l'hydrodynamique. Il peut être résolu par plusieurs méthodes. Dans notre travail nous avons opté la méthode directe pour résoudre le modèle MHD à l'aide d'un logiciel éléments finis, générateur d'équations, COMSOL Multiphysique.

[ref] Charles Cyr. Modélisation et caractérisation des matériaux magnétiques composites doux utilisés dans les machines électriques. Sciences de l'ingénieur [physics]. Arts et Métiers Paris- Tech, 2007.

*CONCLUSION*

*GÉNÉRALE*

## Conclusion Générale

La magnétohydrodynamique (MHD) c'est l'art et la manière d'agir sur un fluide, liquide ou gaz, en faisant agir sur lui des forces électromagnétiques. Le but assigné à ce travail été l'étude du comportement MHD d'une machine électrique refroidie par un fluide et comme ce domaine est très vaste et implique de nombreuses applications vue types de machines électriques existante, on a basé nos applications sur les transformateurs et précisément un transformateur haute tension refroidi par l'huile (borak22), et un autre basse tension refroidi par l'air forcé, pour cela une modélisation numérique des phénomènes couplés (électromagnétique – thermique-écoulement ) a été nécessaire.

Tout d'abord, dans une première partie, on a présenté des généralités utiles sur les systèmes de refroidissement industriels et les systèmes de refroidissement des machines électriques afin de familiariser le lecteur avec le contenu de mémoire. On a commencé à citer les modes de refroidissement dans l'industrie et en électrotechniques (machines électriques), nous avons montré les différents types avec leurs conceptions pour connaître leurs nécessités et leurs impacts dans l'électrotechnique puis, on a décrit quelques types de transformateurs sur lesquels on a fait des applications numériques. Les phénomènes relevant de la magnétohydrodynamique dans ces systèmes refroidis sont décrits par un système d'équations constitué de la réunion des équations hydrodynamiques qui sont les équations de Navier Stokes et celles de Maxwell. La modélisation de ces phénomènes complexes, électromagnétique, thermique et écoulement était l'objet de deuxième chapitre. Ces phénomènes multiphysiques sont décrits par des équations aux dérivées partielles, associés aux propriétés des milieux considérés. Ce genre d'ensemble d'équations couplées, généralement résolu simultanément ou alternativement par des méthodes, de type analytique ou semi-analytique soit numérique. L'utilisation des méthodes numériques éléments finis permet de représenter le couplage entre les équations qui régissent le système à étudier et qui sont les équations de base de la physique des milieux continus : équations de Maxwell, l'équation de diffusion de la chaleur et les équations du mouvement du fluide (Navier-Stock). Ce chapitre avait pour but aussi de décrire deux modèles fluides incompressible (huile) et compressible (air, avec une variation de la densité de charge volumique), stationnaire et en 2D, utilisé pour l'étude des différentes grandeurs MHD aux seins de deux transformateurs distincts trouvés dans la littérature. Cette partie nous a permis aussi, de présenter une vue

d'ensemble des aspects théoriques et numériques (la MEF), d'un modèle magnétohydrodynamique en mécanique des fluides. A travers ce chapitre on a adapté un modèle (MHD) complet basé certes sur des hypothèses de calcul simplificatrices, mais qui permet de mettre en évidence l'évolution des différentes grandeurs EM, écoulement et thermique et l'effet dynamique sur le refroidissement des transformateurs. Dans ce modèle du couplage fort développé sous le logiciel Comsol Multiphysiques, les problèmes électromagnétique, thermique et d'écoulement sont résolus d'une manière directe. Cette approche que nous avons développée repose sur la résolution simultanée des équations EDP (de Maxwell et de celles de Navier- Stokes). L'utilisation du potentiel vecteur magnétique et scalaire électrique (A-V) offre une solution très générale pour la résolution des équations de champ électromagnétiques. Dans les applications envisagées il existe une forte interdépendance entre les phénomènes couplés. Les modèles développés MHD a permis de dégager les allures générales des champs électromagnétiques, de température et d'écoulement. Un ensemble des résultats obtenus pour différentes simulations du modèle MHD éléments finis, sont présentés, interprétés et discutés en détail dans le dernier chapitre. On a retrouvé certains aspects physiques confinement magnétique l'exclusion de certains des grandeurs électromagnétiques à l'axe de symétrie, gradient de température et l'effet de l'environnement, effet de vitesse sur le refroidissement courants de recirculation.

Ce travail de master ouvre diverses perspectives de poursuites de travaux dans de nombreux domaines tels que le génie électrique, le génie des procédés et la modélisation d'écoulement des fluides et de cinétique chimique. Parmi les points nécessitant des travaux complémentaires, on peut envisager: étude MHD des systèmes de refroidissements des alternateurs, modélisation des pompes MHD à conduction.

# ***SOMMAIRE***

# Sommaire

---

<b>Introduction générale</b> .....	1
------------------------------------	---

---

<b>Chapitre I : Généralités sur les systèmes de refroidissement</b>	
I. Introduction.....	3
II. Les systèmes de refroidissements industriel.....	3
II.1. Systèmes de refroidissement de liquides .....	3
II.1.1. Condenseurs à air.....	5
II.2. Systèmes de refroidissement par voie humide en circuit fermé .....	6
II.3. Systèmes de refroidissement à tirage mécanique en circuit fermé.....	7
II.4. Condenseurs évaporatifs.....	7
II.5. Systèmes de refroidissements hybrides en circuit fermé.....	8
II.5.1. Pulvérisation d'eau sur la batterie à surface lisse.....	8
II.5.2. Refroidisseurs adiabatiques, humidification et pré-refroidissement de l'air qui refroidit les batteries .....	8
II.6. Système aéroréfrigérants.....	9
III. Applications en électrotechnique.....	9
III.1. Alternateurs.....	9
III.1.1. Le refroidissement à l'hydrogène .....	10
III.1.2. Refroidissement a l'eau des barres du stator .....	12
III.2. Les transformateurs .....	13
III.2.1. Le modèle OFAF (huile forcé, air forcé) .....	14
III.2.2. Le modèle OFWF (huile forcé, eau forcé) .....	15
III.2.3. Les refroidisseurs de type "FURNACE" .....	15
III.2.4. Le modèle ONWF (huile naturel, eau forcé) .....	15
IV. Types de Transformateurs .....	16
IV.1. Transformateur à colonnes .....	16
IV.1.1. Le Circuit magnétique .....	17
IV.1.2. Limitations des transformateurs à colonnes.....	17
IV.2. Transformateur cuirassé .....	17
IV.2.1. Les enroulements .....	18
IV.2.2. Avantages et inconvénients du transformateur cuirassé .....	19
<b>Conclusion</b> .....	19

---

## Chapitre II : Phénomènes multi-physiques

---

<b>Introduction</b> .....	20
II. Phénomènes multiphasiques.....	20
II.1 La Magnétohydrodynamique (MHD).....	20
II.2 Equations de Maxwell.....	20
II .2.1. Relations constitutives des Matériaux.....	23
II .2.2. Conditions de passage.....	25
II .2.3. Conditions aux limites naturelles.....	27
II .2.4. Conditions de Jauge.....	27
II .2.5. Différentes Formulations Electromagnétiques.....	27
II .1.5.1. Phénomène Electrostatique.....	28
II .1.5.2. Formulation du modèle magnétostatique.....	29
II .2.7. Formulation du modèle magnétodynamique.....	30
II .3. Model Thermique.....	31
II .3.1. Equations de Transfert de Chaleur.....	32
II.3.1.1. Conduction Thermique.....	32
II .3.1.2. Convection Thermique.....	33
II .3.1.3. Rayonnement Thermique.....	34
II .3.2. Couplage Electromagnétique et Thermique.....	34
II .4. Dynamique des Fluide.....	35
II .4.1. Equations de Navier stocks.....	35
II .4.1.1. Formulations vectorielles.....	35
II .4.1.2. Formulations en coordonnés cartésiennes bidimensionnelles.....	36
II .4.2. Les thermes sources.....	37
II.5 Récapitulatif des Equations du Modèle MHD.....	37
II .6. Méthodes de Résolution.....	38
II .6.1. Méthodes analytiques.....	38
II .6.2. Les méthodes semi-analytiques.....	38
II .6.3. Les méthodes numériques.....	39
<b>Conclusion</b> .....	42

---

## Chapitre III: Applications

---

<b>I. Introduction</b> .....	43
II. Applications.....	43
II.1 Modélisation d'un Transformateur de Puissance THT/HT .....	43
II.2 Etude MHD de Refroidissement par Huile d'un Bobinage d'une Phase du Transformateur .....	50
II.2.1 Représentation de la géométrie de bobinage.....	50
II.2.2 Résultats et Discussions.....	52
II.2.3 Application N 2 : Etude de refroidissement d'un transformateur a noyau torique refroidi par l'air.....	57
<b>Conclusion</b> .....	61
<b>Conclusion générale</b> .....	62
<b>Référence</b> .....	64

---



# *RÉFÉRENCES*

## References bibliographiques

- [1] **L. Leboucher, P. Marty, A. Alemany**, «An Inverse Method In Electromagnetism Applied To The Optimization Of Inductors», IEEE Transaction On Magnetism, Vol. 28, No. 5, September 1992.
- [2] **L. Leboucher**, « Optimisation Des Convertisseurs MHD à Induction : Problème Inverse En Electromagnétisme », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble, Grenoble, France, 1992.
- [3] **N. BERGOUG**, «contribution a la modélisation numérique d'une pompe magnétohydrodynamique (MHD) annulaire à induction» Thèse de Doctorat, Université de Batna, 2013.
- [4] **R. Berton**, « Magnétodynamique », Editions Masson, Paris, 1991.
- [5] **S. NACEUR**, «Contribution à la Modélisation 2D d'un Convertisseur Magnétohydrodynamique (MHD) à Conduction » Thèse de Doctorat, Université de Batna, 2015.
- [6] **M. Tawk**, "Etude et réalisation d'un système de refroidissement pour l'électronique de puissance base sur la mise en mouvement d'un fluide conducteur électrique " Thèse de doctorat, l'université de Grenoble, 2011.
- [7] **Commission européenne** .document de référence sur les meilleures techniques Disponibles Systèmes de refroidissements industriels Décembre 2001
- [8] **Balcke Dürr AG**, Air-cooled heat exchangers, Ratingen (D), 1996.
- [9] **Baltimore Aircoil**, H2O conserving HXI hybrid fluid cooler, Information Leaflet, Heist-op-den- Berg (B), 1999.
- [10] **Betz handbook** of industrial water conditioning, 9th edition, Trevese, U.S.A (1991).
- [11] **Trace industry**, applications 002. Sense of innovation
- [12] **Thermoflin**. Document sur les systèmes de refroidissement des transformateur T-REX, [www.thermoflin.net](http://www.thermoflin.net)
- [13] **Christophe Guerin** «Détermination des pertes par courants de Foucault dans les cuves de transformateurs-modélisation des régions minces et prise en compte de la saturation des matériaux magnétiques en régime harmonique» Thèse de doctorat Institut National Polytechnique de Grenoble, 1994.
- [14] **T. Nakata ; N. Takahashi ; Y. Kawase** «magnetic performance of step-lap joints in distribution transformer cores» IEEE Transactions On Magnetism, Vol. Mag-18, No. 6,

- November 1982.
- [15] **Juan Carlos Olivares; Yilu Liu; Jose M. Canedo; Rafael Escarela-Perez; Johan Driesen; Pablo Moreno** «Reducing Losses in Distribution Transformers» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, No. 3, pp 821-826, July 2003.
- [16] **Anthony Lefevre** « Contribution a la modélisation électrique, électromagnétique et thermique de transformateurs application à l'étude de l'échauffement surcharges non linéaires » Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes Année 2006.
- [17] **Madjid MEZIANI** « Contribution à la modélisation analytico-numérique des transformateurs de puissance » Thèse de l'ingénieur de l'Université de TIZI OUZOU Année 2011.
- [18] **Ikhlef Nabil**, " Modélisation numérique d'une installation convertisseur-plasma d'induction en vue d'une commande optimale " Thèse de doctorat en sciences 2010
- [19] **G. Fournet**, "Electromagnétisme", *Technique de l'ingénieur*, vol. D 1 020, 2001, *Traité Convertisseurs et Machines Electriques*, 1993, p. 1-89.
- [20] **M.V.K. Chari, G. Bedrosian, J. D'Angelo and A. Konrad**, "Finite Element Applications in Electrical Engineering", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 29, n° 2, March 1993, p. 1306-1314.
- [21] **P. Molino, M. Repetto**, " Fully coupled quasi-axisymmetric magnetothermal model for skin analysis in resistive tokamak coils ", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 25, No. 5, September 1989.
- [22] **Gérard Develey**, " Chauffage par induction électromagnétique : technologie ", *Technique d'ingénieur*, D5936, 2000.
- [23] **R. Delimi**, " Méthodes comparées pour le calcul des forces d'origine électromagnétique. Application aux paliers magnétiques ", mémoire de Magistère, Université de Constantine, 2008.
- [24] **Régulateur Cetrisa-séparateur des métaux**, Barcelona, 2009.
- [25] **J. Jin**, "The Finite Element Method in Electromagnetics", Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons Inc., 1993.
- [26] **M. Talbi, R. Loucif**, " Contribution à la modélisation numérique du magnétoformage par la méthode des éléments finie. Application au placage " projet de fin d'étude en génie électrique centre Universitaire Jijel 2001
- [27] **J. C. Sabonnardière et J. L. Coulomb**, "Calcul des Champs Electromagnétiques", *Technique de l'ingénieur, Traité Convertisseurs et Machines Electriques*, vol. D 3 020, 1988, p. 1-19.

- [28]K. Hameyer, J. Driesen, H. De Gersem, and R. Belmans, "The classification of coupled field problems", IEEE Transactions On Magnetics, 35(3):1618–1621, may 1999.
- [29]M. Feliachi, Develey, " Magneto-thermal behavior finite element analysis for ferromagnetic materials in induction heating", IEEE Transactions on magnetics, Vol.27, N<sup>o</sup> 6.November 1991
- [30]Charles Cyr, " Modélisation et caractérisation des matériaux magnétiques composites doux utilisés dans les machines électriques.HAL Id: pastel-00003791.Submitted on 20 Jun 2008