

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

**Mémoire de Fin d'Etudes  
De MASTER PROFESSIONNEL**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : **Electrotechnique**

Spécialité : **Electrotechnique industrielle**

*Présenté par*

**Faredj AZOUAOU**

**Nabil ABDELALI**

Thème

**Modélisation thermique d'une encoche  
statorique d'une machine asynchrone**

*Mémoire soutenu publiquement le : 29/09/2016 devant le jury composé de :*

**M<sup>r</sup> DENOUN Hakim**

M.C.A, UMMTO, President

**M<sup>r</sup> Khaldi Rabah**

M.A.A, UMMTO, Encadreur

**M<sup>r</sup> BOUTORA Youcef**

M.C.A, UMMTO, Examineur

**M<sup>r</sup> DJOUDI Hakim**

M.A.A, UMMTO, Examineur

# Remerciement

*Avant tout nous remercions notre dieu de nous avoir donné la force et le courage.*

*Mes vifs remerciements vont à l'encontre de mon encadreur Monsieur R. Khaldi, pour sa grande disponibilité lors de nos différentes sollicitations et ses précieux conseils pour l'élaboration de ce projet.*

*Je remercie le président et les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font en examinant notre travail*

*Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance à tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration et la finalisation de ce mémoire.*

# Remerciement

Je tiens à exprimer mes plus sincères et chaleureuses remerciements et gratitude pour mon encadreur M<sup>r</sup> KHALDI RABAH qui m'a proposé ce sujet et la suite de ses aides durant ce travail.

Je remercie également toutes les personnes,  
Qui m'ont soutenu, membres de la famille et mes amis

Je remercie vivement les membres de jury qui

Me feront l'honneur d'évaluer

Mon travail.

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail :*

*À ma fabuleuse étoile ma très chère mère*

*À mon père : le plus bon de tous les pères*

*À mes sœurs Khoukha et Samira*

*Et à toute ma famille en général.*

*Et enfin*

*À mon binôme Faredj avec qui j'ai partagé ce travail.*

*À tous mes amis avec qui j'ai partagé des moments précieux.*

*Nabil*

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail :*

*À ma fabuleuse étoile ma très chère mère*

*À mon père : le plus bon de tous les pères*

*À mon frère Nassim*

*Et mes sœurs*

*Et à toute ma famille en général.*

*Et enfin*

*À tous mes ami(e)s avec qui j'ai partagé des moments précieux.*

*Faredj*

## Résumé

La prise en compte de la limite thermique dans les machines électriques est une étape cruciale, vu l'impossibilité de placer des capteurs dans des machines déjà construites.

Alors nous avons utilisé un stator creux pour placer des capteurs dans le fond et le milieu d'encoche ainsi que la tête de bobine (les lieux les plus chauds théoriquement).

Après avoir réalisé le schéma et ajuster le courant à 3A, on a étudié premièrement le stator creux tout seul et nous avons obtenu une courbe pour avoir la température maximale et pour valider ce résultat on a pris une photo avec la caméra infrarouge thermique puis on a modélisé sous le FEMM la structure du stator avec les matériaux nécessaires comme le fer et le cuivre avec leur conductivité thermique qui nous a donné les mêmes résultats.

Puis on a introduit un rotor dans le même stator et on fait les mêmes étapes et on a vu des augmentations des températures et de tension ce que explique par l'existence des pertes dans le rotor (cas de rotor bloquer).

Et enfin on calcule les pertes fer et joule par la méthode analytique puis on fait des validations expérimentales.

### **Mot clés :**

Limite thermique, machines électriques, température, pertes fer, pertes joule, méthode analytique, validation expérimentale.

## Sommaire

Introduction générale.....	01
<b>CHAPITRE I : pertes dans une machine électrique asynchrone (application au modèle physique )</b>	
<b>I-1 : Introduction.....</b>	<b>02</b>
<b>I-2 : pertes dans le circuit électrique.....</b>	<b>02</b>
<b>I-3 : pertes dans le circuit magnétique.....</b>	<b>03</b>
<b>I-4 : pertes par courant de Foucault.....</b>	<b>03</b>
<b>I-5 : pertes mécanique.....</b>	<b>04</b>
<b>I-5-1 : pertes par frottement.....</b>	<b>05</b>
<b>I-5-2 : pertes par ventilation.....</b>	<b>05</b>
<b>I-6 : autre pertes.....</b>	<b>05</b>
<b>I-7 : conclusion.....</b>	<b>06</b>
<b>CHAPITRE II : mode de transfert de chaleur et méthodes d'étude Thermique (application au modèle physique)</b>	
<b>I-1 : introduction.....</b>	<b>08</b>
<b>II-2 : transfert de chaleur par conduction.....</b>	<b>08</b>
<b>II-2-1 conductivité thermique.....</b>	<b>09</b>
<b>II-2-2 conductivité thermique des solides hétérogènes.....</b>	<b>09</b>
<b>II -3: Transfert de la chaleur par convection.....</b>	<b>12</b>
<b>II -4: transfert de chaleur par rayonnement.....</b>	<b>13</b>
<b>II -5: Echange thermique dans une machine électrique.....</b>	<b>14</b>
<b>II-6 : méthode d'étude thermique.....</b>	<b>14</b>
<b>II-6.1: la méthode expérimentale.....</b>	<b>14</b>
<b>II-6.1.1: Méthode calorimétrique.....</b>	<b>14</b>
<b>II-6-1-2: Mesure de températures par des capteurs.....</b>	<b>15</b>
<b>II-6-1-3: Mesure de température par caméra infrarouge.....</b>	<b>15</b>

II-6-2: Méthode théorique .....	15
II-6-2.1: méthode nodale .....	15
II -6-2.2 : Méthode numérique .....	17
II-6-2.2.1: Méthode des différences finies .....	18
II-6-2.2.2: Méthode des éléments finis.....	18
II -7 : Conclusion .....	20

### **CHAPITRE III : moyen de mesure de température dans une machine électrique**

<b>III-1 :</b>	
Introduction.....	21
<b>III-2 :</b> Méthode de mesure par contacte directe.....	21
<b>III-2.1 :</b> les thermocouples .....	21
<b>III-2.1.1 :</b> température de référence d'un thermocouple .....	23
<b>III-2.1.2 :</b> différents types de thermocouples .....	25
<b>III-2.1.3 :</b> avantages et inconvénient des thermocouples.....	26
<b>III-2.2 :</b> les thermistances .....	26
<b>III - 2.2.1 :</b> constitution et principe .....	26
<b>III-2.2.2 :</b> avantages et inconvénients des thermistances .....	29
<b>III -3 :</b> comparaison entre les thermocouples et les thermistances .....	30
<b>III -3 :</b> Méthodes de mesure de températures sans contact .....	30
<b>III-3.1 :</b> pyrométrie optique .....	30
<b>III-3 :2</b> principe physique .....	31
<b>III -3.3 :</b> application du pyromètre infrarouge .....	32
<b>III-4 :</b> caméra thermique .....	32
<b>III-4-1 :</b> avantages et inconvénients de caméra thermique .....	32
<b>III -5 :</b> conclusion .....	33

### **CHAPITRE IV : étude expérimentale, comparaison et validation**

IV -1: Introduction.....	34
--------------------------	----

IV -2: Présentation de l’outil de calcul logiciel FEMM.....	34
IV -3: présentation de stator crue.....	35
IV -4: description du banc d’essai.....	36
IV-5 : Etude du stator creux.....	37
IV -5.1 : Emplacements des capteurs dans l’encoche.....	37
IV -5.2 : observation et interprétation des résultats .....	39
IV -5.3: résultats de la caméra infrarouge.....	40
IV-5.4 : Présentation de la structure étudiée .....	40
IV-5.5 : dimensionnement géométrique du stator creux.....	42
IV-5.6 : résultats de la modélisation par FEMM.....	43
IV-6 : étude du stator avec rotor.....	44
IV-6.1 : observation et interprétation des résultats.....	44
IV-6.2 : mesure de la température avec caméra thermique.....	45
IV-6.3 : résultats de la modélisation par FEMM .....	46
IV-7 : méthode de calcul analytique pour le stator creux.....	49
IV-7.1 : Calcul de l’induction statorique.....	49
IV-7.2 : calcul des pertes dans les dents et la culasse statorique.....	50
IV-8 : calcul des pertes fer par expérience .....	51
IV-9 : calcul analytique des pertes du stator avec rotor.....	52
IV-9.1 : calcul de l’induction dans l’entrefer .....	52
IV-9.2 : calcul des pertes des dents et la culasse du stator avec rotor .....	52
IV-10 : calcul des pertes fer par expérience.....	53
IV-11 : conclusion .....	54
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>55</b>

## **Bibliographie**

## **Annexes**

# **Introduction Générale**

## **Introduction générale :**

Depuis son invention au siècle dernier la machine asynchrone qui est une machine électrique à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor elle est imposée dans l'industrie grâce à sa robustesse, sa fiabilité et son faible coût, surtout après le développement considérable de l'électronique de puissance et la commande vectorielle ces dernières années. Ces machines fonctionnent souvent près de leurs limites thermiques.

C'est pour cette raison qu'il est indispensable de connaître le comportement thermique et la température en tout point de la machine. Ce qui explique l'importance donné par le constructeur et l'utilisateur aux études pour une détermination et l'analyse de l'échauffement de la machine asynchrone.

Ces études sont réalisables par plusieurs méthodes mais la plus utilisable est la modélisation thermique pour ses avantages et sa facilité, mais l'utilisation d'un modèle thermique théorique n'est pas précis car il tient compte des hypothèses simplificatrices, Alors on réalise aussi une étude expérimentale qui reste indispensable pour des considérations pratiques.

Notre travail est basé et consacré à l'étude expérimentale et la modélisation de l'échauffement dans l'encoche statorique d'une machine asynchrone.

Pour cela on a un dispositif expérimental pour mesurer la température au niveau de l'encoche statorique puis on modélise cette expérience sur le logiciel FEMM et on compare les résultats obtenus.

Cette expérience est basée sur un stator creux équipé de deux capteurs dans l'encoche et un sur la tête de la bobine, pour connaître la température et sa distribution dans l'encoche, alors on divise notre travail en quatre chapitres :

- Généralités sur les pertes dans une machine électrique.
- Mode de transfert de chaleur et les méthodes d'étude thermique.
- Moyen de mesure de températures dans une machine électrique.
- Etude expérimentale, comparaison et validation.

# Chapitre I

## **Pertes dans une machine asynchrone.**

## 1.1 Introduction :

Lors de la transformation d'énergie d'une manière générale soit de l'énergie mécanique vers l'énergie électrique ou vice-versa, il y a des pertes qu'on doit prendre en considération. Ces pertes se transforme pratiquement dans notre étude on a trois différents types de pertes:

- **les pertes dans le circuit électrique:**

Ces pertes sont prises en considération dans toute la partie de la machine qui est traversée par le courant électrique.

- **les pertes dans le circuit magnétique:**

Elles sont appelées aussi des pertes fer (par hystérésis et par courant de Foucault) [2].

- **les pertes mécaniques:**

Elle présente les pertes par frottement et ventilation et les pertes du phénomène parasite (courant et flux de fuite a fréquence fondamentale ou courant et flux de fuite a fréquence harmonique) [1].

## 1.2 Les pertes dans le circuit électrique:

Les pertes électriques sont divisées en deux catégories:

Les pertes dans les conducteurs et les pertes dans le fer. Dans les conducteurs, elles sont dues à l'effet Joule. Elles sont exprimées par la formule suivante :

$$P = 3RI^2[W] \quad (I-1)$$

Où :

I : est le courant qui parcourt l'enroulement de résistance.

P: Ces pertes se manifestent par la chaleur qui se dégage des conducteurs.

R : résistance du conducteur.

Au lieu d'utiliser la formule  $P = RI^2$ , il est parfois plus commode de calculer les pertes d'après la masse des pertes, échauffement, rendement et dimensions des machines électriques.

## 1.3 Les pertes par hystérésis:

Sous excitation cyclique (sinusoïdale, par exemple), le matériau magnétique fait un cycle d'hystérésis et crée ainsi des pertes d'énergie dans le noyau sous forme de chaleur. Les pertes par hystérésis sont directement proportionnelles à la surface du cycle d'hystérésis et à la fréquence d'opération. Une formule empirique permet de calculer les pertes (par m<sup>3</sup>) :

$$P_{\text{hys}} = KfB_{\text{max}}^2 \quad (\text{I-2})$$

Où :

$P_{\text{hys}}$  : puissance des pertes par hystérésis

$K$  : est une constante qui dépend du matériau.

$B_{\text{max}}$  : est la valeur maximale de la densité de flux

$f$  : est la fréquence de fonctionnement.

On réduit les pertes par hystérésis en utilisant des tôles ayant un faible pourcentage de Silicium (0.8 à 3.5%) ou en utilisant des tôles à grains orientés (tôles en silicium à faible teneur en carbone).

## 1.4 Les pertes par courant de Foucault:

Le champ magnétique alternatif induit dans le noyau par des forces électromagnétiques crée des courants induits dans le matériau. Ces courants induits créent des pertes  $RI^2$  (puisque les matériaux magnétiques ont une résistivité non-nulle). Ces pertes sont dissipées sous forme de chaleur.

Afin de minimiser les courants induits dans le noyau, on utilise des noyaux en forme de lamination isolés électriquement les uns des autres (pour les bobines fonctionnant à basses fréquences) ou des noyaux en ferrite (pour les bobines fonctionnant en hautes fréquences) [3].

## Chapitre I : Pertes dans les machines asynchrone

On peut estimer les pertes par courant de Foucault avec la relation empirique suivante :

$$P_f = K_f (e \cdot B_{\max} \cdot f)^2 \quad (\text{I-3})$$

Avec :

$P_f$  : les pertes par courant de Foucault [w]

$f$  : la fréquence de réseau [Hz]

$B_m$  : induction maximale dans l'entrefer[T]

$e$  : épaisseur de la tôle [mm]

$k_f$ : coefficient caractéristique de la tôle.

Habituellement, les pertes sont estimées à l'aide de données fournissent par les manufacturiers.

### I-4 : Pertes mécaniques :

Contrairement aux machines statique, les machines asynchrones renferment en plus des pertes électriques et magnétiques des pertes mécaniques qui s'intensifient avec l'augmentation de la vitesse de la machine. Elle peut être estimée avec cette équation :

$$P_{mec} = K_t \left(\frac{N}{10}\right)^2 D_e \quad (\text{I-4})$$

Avec :

$K_t$ : 1.3 (1- $D_e$ ) et  $0,1 < D_e < 0,5$  m

$D_e$  : diamètre extérieur de stator

$N$  : vitesse de rotation synchrone [tr /min]

Ces pertes se composent de deux types :

- Pertes par frottements.
- Pertes par ventilation.

#### I-4-1 : Pertes par frottement dans les roulements :

Les contacts des corps roulants (rotor) avec les organes fixes (paliers, balais) provoquent des pertes (échauffement). Ses pertes dépendent de nombreux facteurs comme : la charge appliqué sur les roulements, le type de lubrification (graisse, huile),

type de géométrie du roulement, mais il est difficile de prédire la valeur de ses pertes [4].

### **I-4-2 : Pertes par ventilation :**

Le ventilateur est monté au bout de l'arbre de machine pour refroidir la machine consomme une puissance qui est estimée comme une perte.

En pratique on ne peut pas séparer les pertes mécaniques (par frottement, par ventilation) dans une machine puisqu'elle est due à la rotation, mais on peut le faire à basse vitesse, car dans ce cas les pertes par ventilation sont négligeables, donc on estime juste les pertes par frottement.

### **I-5 Autres pertes :**

En pratique on trouve toujours des pertes qu'on ne peut pas maîtriser qui est due à des phénomènes parasites comme le flux de fuite, et l'influence de la fréquence.

On peut alors citer ces deux facteurs et leurs influences sur les pertes.

#### **•Flux de fuite d'encoche :**

Elle est négligeable dans les machines de faible puissance, on les trouve dans les parties conductrices du stator et de rotor, ils sont dû à la distribution non sinusoïdale de la FMM dans l'entrefer, elles sont déterminées par l'expression suivante :

$$P = mI^2rK_iK_{di} \quad (I-5)$$

Avec :

P : pertes de fuite d'encoche.

m : nombre de phase de stator.

I : courant d'une phase de stator.

r : résistance d'une phase rotorique ramenée au stator.

$K_i$  : coefficient d'augmentation des pertes due à l'effet de peau.

$K_{di}$  : coefficient de distribution de l'enroulement statorique.

#### **• Flux de fuite des têtes de bobines :**

C'est des pertes par induction qui se développent dans la partie métallique, le cuivre des conducteurs statoriques et les anneaux rotoriques.

- **Flux de fuite d'inclinaison des encoches :**

Cette inclinaison provoque un déphasage entre les forces magnétomotrices du stator et de rotor, et les pertes entre les barres et le fer rotorique.

- **Pertes à fréquence fondamentale :**

Quel que soit la technologie utilise il existe toujours un flux de fuite dans les différentes parties de la machines.

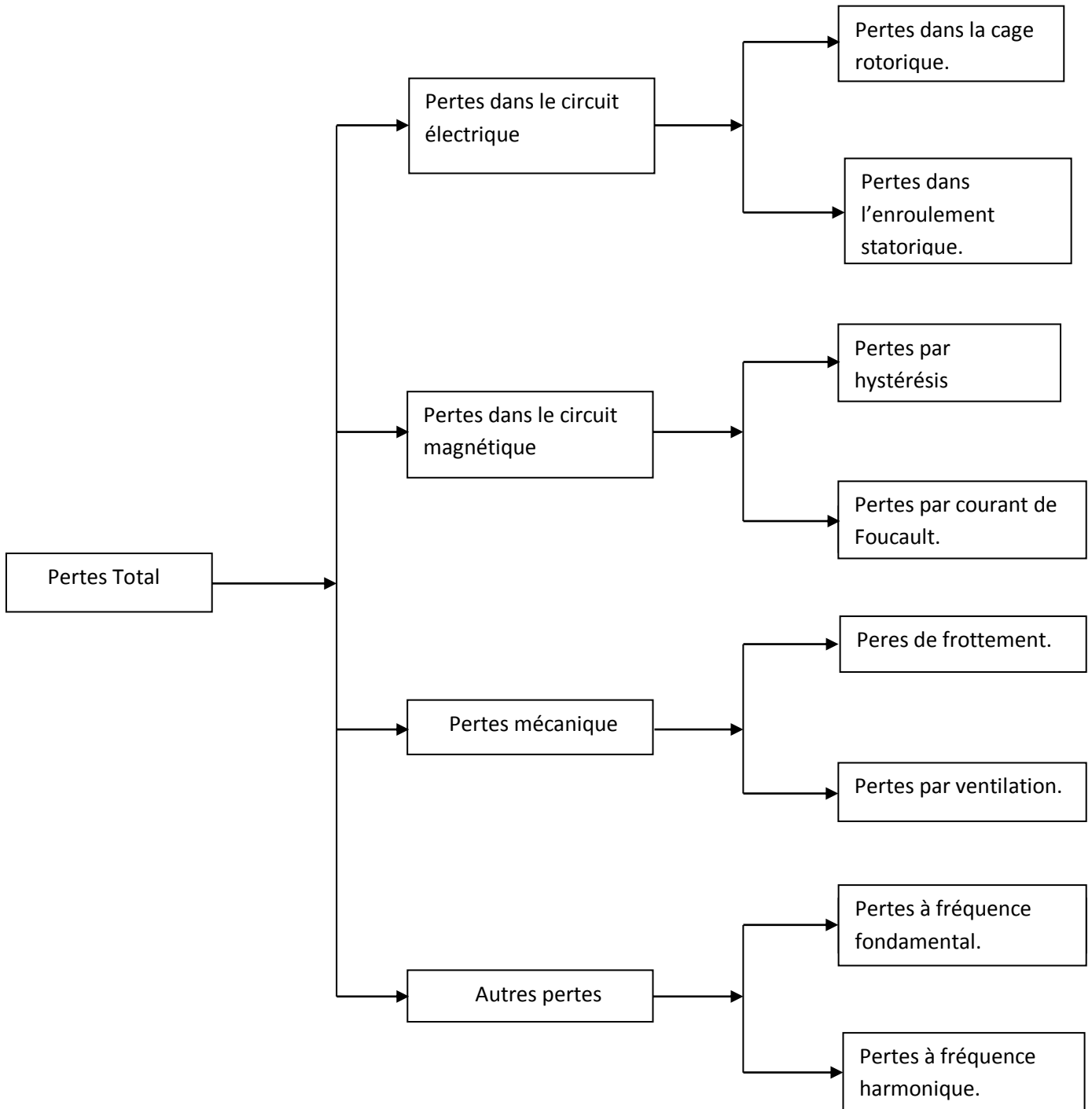
L'ensemble de ces fuites est proportionnelle au carrée du courant statorique.

- **Pertes à fréquence harmonique :**

On peut les considérées comme des pertes fer supplémentaires, causé par l'altération de la forme de la force magnétomotrice et le changement de la perméabilité de l'entrefer.

### **I-6 conclusion :**

Nous avons exposé dans ce chapitre les différentes pertes qui existent dans les machines en mode de fonctionnement moteur, Ces pertes se propagent dans la machine (partie conductrice) sous forme de chaleur puis vers le milieu extérieur ou elle est cédée pour la protection de la machine, ces pertes sont représentées dans la figure I-1.



**Fig I-1 : Différentes pertes dans un moteur asynchrone.**

## Chapitre II

# **Modes de transfert de chaleur et méthode d'Etude thermique.**

### II-1 Introduction :

A cause des pertes qui accompagnent la conversion de l'énergie, les machines asynchrones sont le siège des nombreuses sources de chaleur de différents origines et localisations (électrique, mécanique et magnétique). Ce qui explique l'augmentation de la température à l'intérieur de la machine, l'évacuation de cette chaleur s'effectue par trois modes de transfert :

- 1-Transfert de chaleur par conduction dans la machine.
- 2-Transfert de la chaleur par convection, naturel ou forcé, externe ou interne.
- 3-Transfert de la chaleur par rayonnement entre les parois externe ou interne de la machine.

Dans ce chapitre nous donnons la description et les définitions de ces modes de transfert puis les lois qui les régissent.

### II-2 transfert de chaleur par conduction :

L'évacuation de la chaleur par conduction s'opère au sein d'un même milieu, elle est provoquée par la différence de température entre deux régions [6].

Ce mode de Transfer est régi par la loi de Fourier qui exprime que la densité de flux thermique  $\vec{\varphi}$  est proportionnelle :

Au gradient de température, et à la conductivité thermique  $\lambda$ .

Pour un milieu isotrope et homogène, la densité de flux de chaleur s'écrira sous la forme suivante :

$$\vec{\varphi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (\text{II-1})$$

Avec :

$\vec{\varphi}$  : Densité de flux thermique [W /m<sup>2</sup>]

T : température [C°]

$\lambda$ : conductivité thermique [W /m C°]

Le signe (-) de la relation de Fourier traduit le fait que l'échange de la chaleur se fait du corps chaud vers le corps froid

$\lambda$  définit la nature du matériau, conducteur ou isolant (par rapport à la conductivité de la chaleur).

## II-2-1 conductivité thermique :

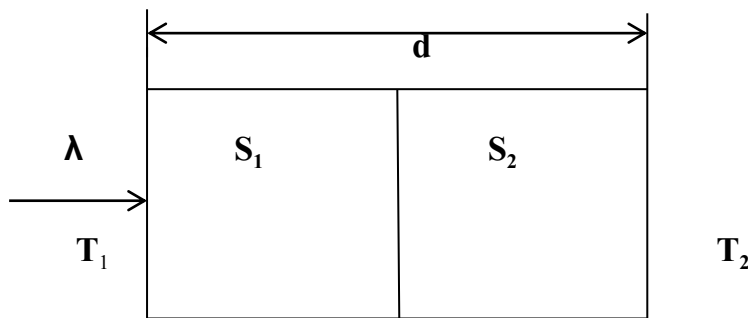
La conductivité thermique  $\lambda$  (coefficient de conduction thermique) à un rôle très important dans le matériau car c'est une propriété chimico-physique de la matière [4]. En pratique, généralement on considère  $\lambda$  comme une constante si la différence de température n'est pas considérable, alors on peut l'exprimer par trois composants pour saisir sa signification physique, de la relation de Fourier on peut écrire :

$$\lambda = \frac{|\vec{\phi}|}{\text{grad } T} \quad [\text{W} / \text{m k}] \quad (\text{II-2})$$

Alors  $\lambda$  physiquement, elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface.

## II-2-2 conductivité thermique des solides hétérogènes :

Nous utilisons la notion de la conduction à travers un matériau de conductivité  $\lambda$  et pour déterminer la conductivité thermique des solides hétérogènes, avec une épaisseur (d) et de section (s), les températures des faces sont  $T_1$ ,  $T_2$  et l'écoulement de la chaleur est irréversible de  $T_1$  à  $T_2$ , et d'un flux transmis  $\phi$ .



**Fig. II-1 : transmission de chaleur par conduction**

La relation entre le flux d'énergie transmise et la température entre deux surfaces est donnée par la loi de Fourier suivante :

$$\phi = \frac{\lambda S}{d} (T_1 - T_2) \quad (\text{II-3})$$

Avec :

$\Phi$  : le flux d'énergie transmise

S : surface à travers laquelle se propage le flux thermique.

d : distance entre les deux matériaux

$\lambda$  : conductivité thermique

$T_1, T_2$  : température entre deux surfaces

Alors :

$$T_1 - T_2 = \frac{\phi d}{\lambda S} \quad (\text{II-4})$$

Par analogie avec la loi d'ohm on déduit l'expression de la résistance thermique en cas du milieu de forme homogène, on se base sur la relation précédente :

$$R = \frac{d}{\lambda S} = \frac{T_1 - T_2}{\phi} \quad (\text{II-5})$$

Mais si le milieu a des formes différentes, on écrit :

$$R = \frac{d}{\lambda S_{\text{moy}}} \quad (\text{II-6})$$

❖ **Cas d'un cylindre:**

$$S_{\text{moy}} = \frac{S_1 - S_2}{\log\left(\frac{S_2}{S_1}\right)} \quad (\text{II-7})$$

Ou  $S_{\text{moy}}$  : la surface moyenne interne et externe des deux surfaces.

❖ **Cas d'une sphère**

$$S_{\text{moy}} = \sqrt{S_1 \cdot S_2} \quad (\text{II-8})$$

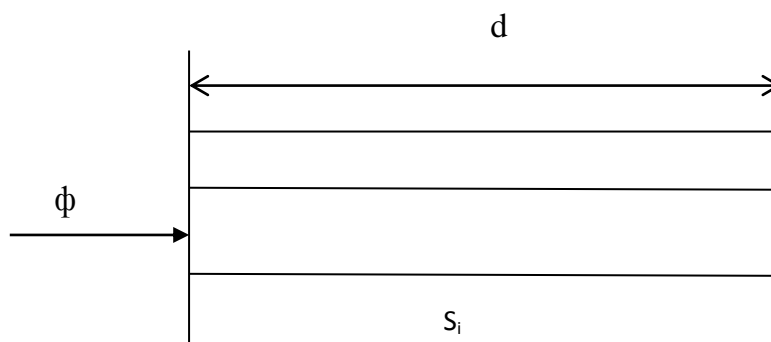
$S_{\text{moy}}$  : la surface moyenne géométrique interne et externe.

Si on a des milieux différents avec plusieurs couches (i) de formes identiques ou semblables il existe deux cas :

➤ **Association parallèle :**

C'est le cas où le flux se propage en parallèle par rapport aux différentes couches (i), la relation entre la conductivité et la surface et l'épaisseur est donnée par la formule suivante :

$$\lambda_{\text{eq}} \frac{S_{\text{moy}}}{d} = \sum_i \lambda_i \frac{(S_i)_{\text{moy}}}{d_i} \quad (\text{II-9})$$

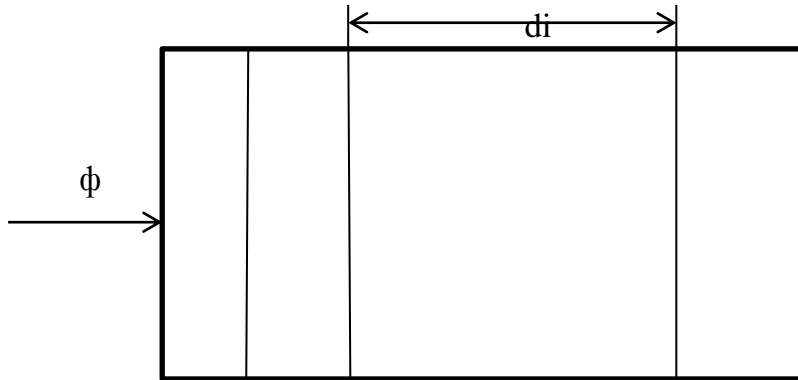


**Fig II-2 : association parallèle**

➤ **Association série :**

C'est le cas où le flux circule en série par rapport aux différentes couches (i) la conduction se détermine de la relation suivante :

$$\frac{1}{\lambda_{eq}} \cdot \frac{d}{s_{moy}} = \sum_i \frac{d_i}{\lambda_i (S_i)_{moy}} \quad (II-10)$$



**Fig II-3 : Association série**

**II-3 Transfert de la chaleur par convection :**

Le Transfert de la chaleur par convection thermique est dû au déplacement de la matière par l'intervention d'un fluide, cela est causé par la variation de la pression ou de température cet échange se fait entre une surface d'un solide et un fluide ou entre fluide en mouvement (la partie chaude de fluide monte et la partie froide descend) [8].

Ce mode (transfert de la chaleur par convection) peut-être modélisé par la loi de Newton qui relie la densité de flux et la variation de température entre deux milieux par la relation :

$\Phi = h \cdot S \cdot (T_p - T_{ref}) \quad (II-11)$
--

$h$  : coefficient d'échange connectif [ $W / m^2 / K$ ].

$S$  : la surface d'échange [ $m^2$ ].

$T_p$  : Température de la paroi [k].

$T_{ref}$  : température de référence (température moyen de fluide) [k]

$h$  est très difficile à déterminé car il dépend de plusieurs paramètres comme la géométrie du solide, nature de régime, la vitesse les paramètres thermo physique).

On peut partager ce phénomène de transfert de chaleur en deux catégories, en fonction des causes qui produisent le mouvement de fluide.

- La convection forcée
- La convection naturelle (libre).

• **Convection naturelle** : cette convection se produit lorsque le mouvement de fluide apparaisse naturellement sous effet de la variation de la température en sein de fluide lui-même ou entre le fluide et la surface de contact, Ce phénomène produit généralement sur les culasses extérieures des machines.

• **Convection forcé** : engendré par une action indépendante (extérieur) de la variation de température comme la ventilation par exemple et cela pour assurer une circulation de fluide dans les canaux, ce phénomène peut être subit par toute la machine ou juste une partie d'elle comme l'entrefer et l'espace entre les bobines et la carcasse.

• **Convection mixte** : cette convection fait combiner les deux modes de transferts précédents (naturels et forcé).

L'étude du transfert de chaleur par convection est utilisable pour la détermination de la quantité de chaleur échangée entre le fluide et la paroi.

Le coefficient d'échange thermique est une image de la quantité de la chaleur transférée.

### **II-4 : transfert de chaleur par rayonnement :**

Le rayonnement thermique est une forme de transfert d'énergie sous forme d'onde électromagnétique où l'énergie n'est pas présente que par des particules mais par des ondes électromagnétiques et cela pour chaque corps possèdent une température de 0 K et convertis en chaleur, ce phénomène est basé sur l'absorption des ondes porteuses d'énergie puisqu'ils les convertissent à une chaleur, ce mode de transfert peut être considéré négligeable à l'intérieur des machines électriques tournantes mais il peut se produire dans l'entrefer s'il existe une différence de température entre le rotor et le stator, en terme de température ou quand la surface extérieure refroidit le système par échange radiatif et quand les corps sont séparés par un milieu suffisamment transparent pour les ondes électromagnétiques[9].

Ce phénomène est régi par la loi de Stefan-Boltzmann qui est en relation avec le flux d'échange entre deux corps de températures différentes, cette relation peut être écrite sous la forme suivante :

$$\frac{dQ}{T_d} = \epsilon_{12} \sigma S (T_1 - T_2) \quad (\text{II-12})$$

$\epsilon_{12}$  : est un facteur de forme sans dimension, il dépend de la géométrie considérée.

$\sigma$  : est la constante de Stefan-Boltzmann.

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

$T_1 - T_2$  : différence de température [K]

### II-5 Echange thermique dans une machine électrique :

Quelle que soit la perfection de la machine électrique elle présente un ensemble de sources de chaleur à cause des pertes et de très fortes hétérogénéités due à la propriété des différents matériaux comme les isolants, les conducteurs et l'air qui constituent cette machine [4].

La figure ci-dessous (**II-5**) représente les trois modes de Transfer de chaleur dans une machine :

- La conduction
- La convection
- Le rayonnement

On retrouve ces modes avec des degrés d'importance différents. Le transfert par conduction est prédominant car les matériaux sont la source principale ou est produite la chaleur, puis la convection qui existe généralement dans l'entrefer et l'extérieur de la machine et le rayonnement qui est négligeable à cause de la baisse de la température [1].

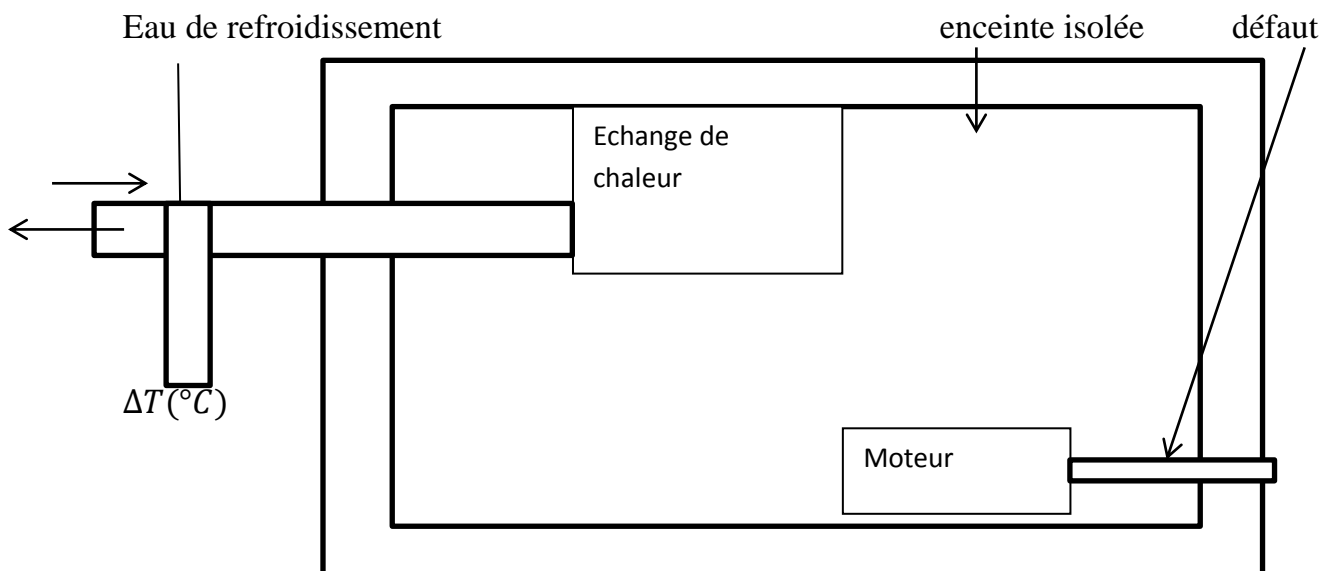
### II.6.Méthodes d'étude thermique:

Cette méthode s'intéresse à deux axes principaux, le premier axe est basé sur la détermination de la distribution de la température dans la machine électrique expérimentalement et le deuxième axe sur la modélisation théorique.

### II .6.1.la méthode expérimentale:

Pour valider les résultats de la méthode théorique il est indispensable d'utiliser la méthode expérimentale, pour cette méthode on utilise différents appareils pour mesurer les conditions de fonctionnement, il existe plusieurs moyens pour obtenir la température expérimentale et parmi eux on prend ce qui suit

#### II .6.1.1.Méthode calorimétrique:



**Fig-II-5 : dispositif de mesure calorimétrique**

Cette méthode n'est pas efficace pour déterminer les pertes d'une machine électrique car elle est basée sur des infrastructures lourdes pour isoler la machine et mesurer l'énergie calorifique fourni par le système de refroidissement, et son temps de réponse est très lent et représente des problèmes majeurs comme l'imprécision, des pertes de chaleur et encore des fuites de chaleur sont dues au contact de défaut d'isolement, le principe de cette méthode peut être présent dans la figure ci-dessus [4].

#### II-6-1-2 Mesure de température par des capteurs :

Ce mode de mesure est basé sur l'utilisation des capteurs classique qui sont généralement les thermistances et les thermocouples leurs utilisation n'est pas efficace pour les endroits difficilement accessibles comme les endroits les plus chauds et les parties en mouvement et les parties internes de la machine l'entrefer par exemple [7].

#### II-6-1-3 .Mesure de la température par caméra infrarouge :

Pour la résolution du problème précédent il est indispensable d'utiliser les méthodes technologiques avancées comme la caméra thermique. Cette dénaire mesurer et détecter des tendances thermiques ou variation de température dans la machine ou objet sans contact [7].

### II-6-2. Méthode théorique :

En utilise cette méthode pour développer des modèle thermique, qui après validation par des résulta expérimentaux, qui vont servir à la conception de nouvelle machines.

#### II-6-2-1.Méthode nodale

L'approche nodale est basée sur l'analogie électrique-thermique. Les transferts de Chaleur sont alors représentés sous forme d'un réseau. La tension est la température au nœud considéré, le courant électrique est représenté par un flux thermique, la source de courant est la source de chaleur (pertes électriques et magnétiques) et la capacité électrique par une capacité thermique.

On donne le tableau d'analogie thermoélectrique :

<b>Grandeurs thermiques</b>	<b>grandeurs électriques</b>
Température	Tension
Capacité thermique	Capacité électrique
Conductance thermique	Conductance électrique
Puissance calorifique	Courant électrique

**Tableau II-1 : analogie thermoélectrique.**

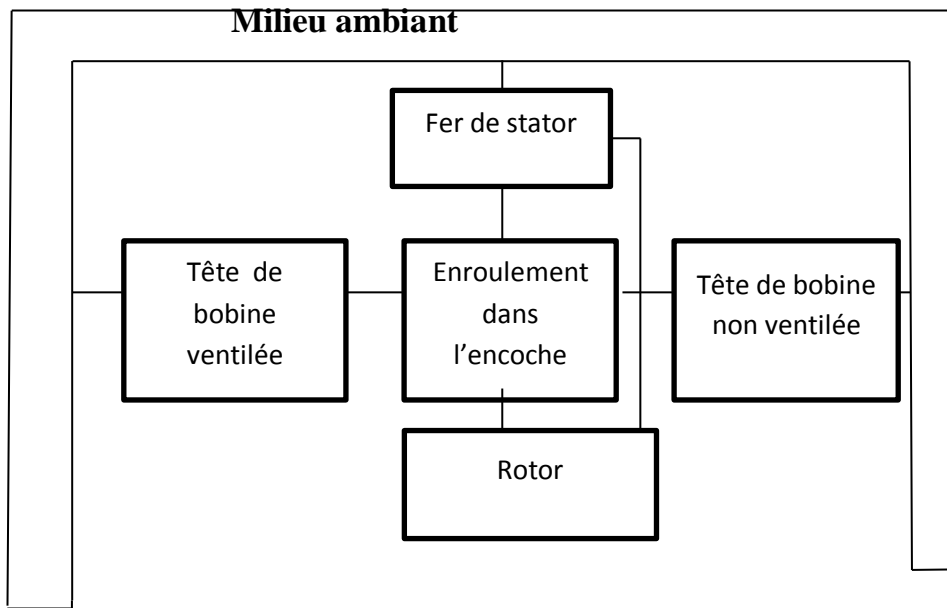
La méthode nodale traite les problèmes 1D, 2D et 3D et les équations utilisées peuvent être non linéaires. Les paramètres thermiques dépendent alors de la température. Les différents modes de transmission de la chaleur associés aux régions de la machine sont déterminés dans un premier temps. Ensuite, la machine est découpée en un certain nombre de volumes élémentaires supposés isothermes à la température de son centre. Chaque volume a une capacité thermique et une source de chaleur affecté en son centre.

Les nœuds de chaque volume sont connectés par des conductances thermiques traduisant la nature d'échange thermique intervenant entre ces nœuds. L'écriture des équations de transfert entre les nœuds conduit à développer un système d'équations différentielles qui est résolu après avoir été mis sous forme matricielle.

Mais cette méthode rencontre plusieurs problèmes qui explique la difficulté de son utilisation comme :

- La non homogénéité des matériaux ce qui complique la détermination des capacités thermique et les coefficients de conductibilité.
- La distribution des pertes mais les sources correspondante ne sont pas accessible.
- La ventilation doit-être prise en compte.

Pour le souci de simplifier les réseaux nodaux complexe, parfois la machine est subdiviser en Cinq bloc chaque partie est identifié par un nœud dans le réseau thermique avec sa capacité thermique et la source de chaleur correspondante. Comme on le présente dans la figure ci-dessous :



**FigII-6 : découpage du moteur en 5 parties.**

On peut déterminer la température aux nœuds si on est au régime permanent avec la résolution de système suivant :

$$[G]\{\theta\} = \{P\} \quad (\text{II-13})$$

Ou :

G : la matrice des conductances thermique.

$\theta$  : Le vecteur de température inconnu.

P : Le vecteur des pertes.

Les équations de transfert associé à chaque nœud peuvent s'écrire comme suit :

$$C_i \frac{d\theta}{dt} = \sum_{j=0}^n G_{ji}(\theta_j - \theta_i) + P_i \quad (\text{II-14})$$

Avec :

$C_i$  : capacité thermique de bloc i [J/°C].

$\theta_j - \theta_i$  : températures des bloc i et j [°C].

$G_{ij}$  : conductances thermique des connexions entre les blocs j et i [W/°C].

$P_i$  : chaleur généré dans le bloc i [W].

$$C_i = \rho_i \cdot v_i \cdot c_i \quad (\text{II-15})$$

$\rho_i$  : la masse volumique [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

$v_i$  : Volume élémentaire du nœud  $i$  [ $\text{m}^3$ ].

$C_i$  : la capacité massique [ $\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ].

### II-6-2-2 : Méthode numérique :

Cette méthode est utilisable pour ses grands avantages par rapport à la méthode analytique car elle tient compte de tous les paramètres comme la non-linéarité et les géométries complexes, elle est basée sur un découpage fin du système modélisé.

Cette méthode est subdivisée en :

- ❖ Méthode des différences finies.
- ❖ Méthode des éléments finis.

#### II-6-2-2-1 méthode des différences finies :

Cette méthode est basée sur le principe que chaque élément est associé à un nœud relie aux nœuds voisins par un nombre fini de connexion, puis la résolution des équations dérivées de la forme différentielle de l'équation de transfert. la température de chaque nœud est exprimée en fonction de celle des nœuds adjacents, pour cette raison que cette méthode est utilisable depuis longtemps et en plusieurs domaines thermiques.

#### II-6-2-2-2 méthode des éléments finis :

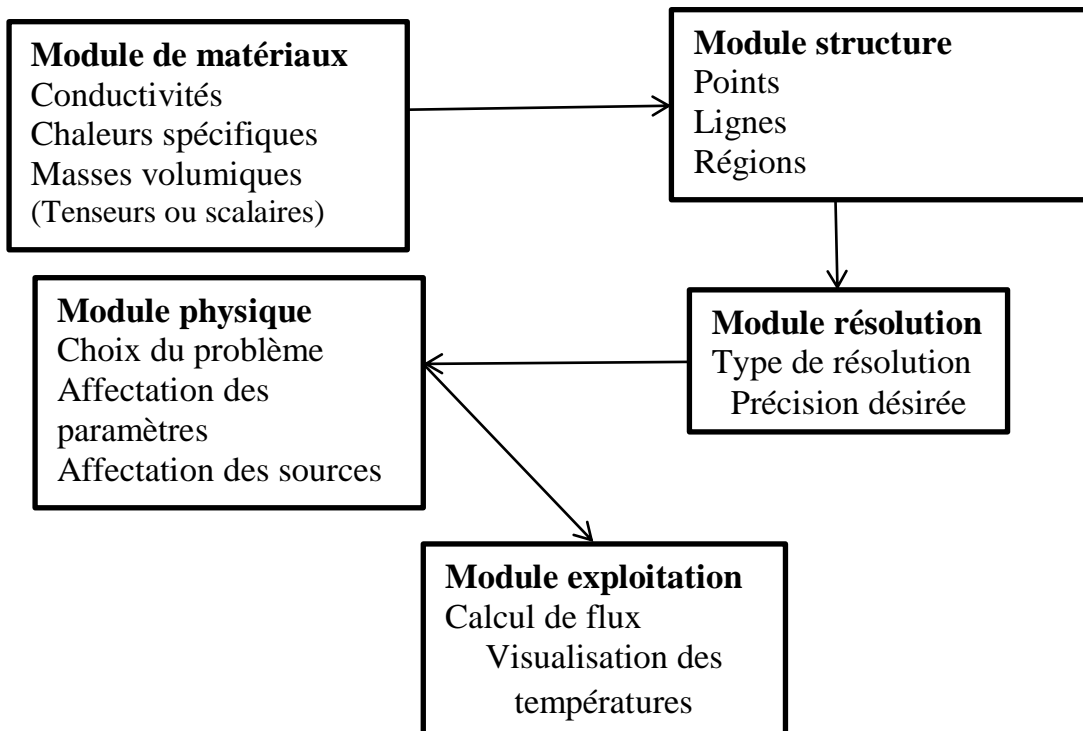
La méthode des éléments finis (MEF) est largement utilisée à l'heure actuelle, pour ses possibilités de calcul de la distribution de températures dans la machine avec une grande précision et les différents couplages envisageables.

Son principe consiste de passer du milieu continu à sa présentation discrète.

La difficulté majeure en utilisant la méthode EF est l'étude du problème thermique de la machine électrique en 3D. En effet, il est en particulier difficile avec cette méthode de tenir compte des couches fines dans certaines parties de la machine et de prendre en compte l'éventuel échauffement du liquide de refroidissement. De plus, le temps de calcul nécessaire au traitement de ce type de problème est souvent important.

Résoudre un problème thermique par MEF consiste à déterminer la répartition spatiotemporelle de la température [4].

On peut schématiser les étapes de la MEF comme suit :



**Fig II-7 : Etape de modélisation par MEF.**



### **II-7 Conclusion :**

On conclue que l'évacuation de la chaleur dans une machine se fait par les différents modes de transfert selon le lieu où elle se trouve et le mode de transfert de chaleur prédominant dans une machine asynchrone c'est par conduction.

Les méthodes thermiques sont en générale complémentaire et on ne peut pas négliger une méthode dans la conception des nouvelles machines.

## Chapitre III

# **Moyens de mesure de température dans une machine électrique.**

### III-Introduction :

L'importance de connaître la température dans une machine est dictée surtout par la limite d'admissibilité thermique de ces isolants. Celle-ci est exprimée par des unités comme le kelvin et le degré celsius sur une échelle donnée. Cette mesure est possible de la faire par plusieurs méthodes différentes pour leurs avantages et inconvénients du point de vue le temps de réponse et la précision de ses équipements mais leur inconvénient majeur est leur coût qui est très élevé [7].

L'évaluation de cette énergie n'est pas atteinte directement, alors on utilise des capteurs pour connaître l'effet de cette chaleur sur des propriétés physiques définies comme la résistance électrique, la dilatation des métaux ou liquides.

Chaque méthode a ses avantages et ses inconvénients surtout que la machine électrique n'est pas homogène et ce qui constitue de différents métaux et il faut connaître la température dans les parties de la machine en plein fonctionnement alors on utilise trois méthodes différentes :

- Méthode de mesure par contact direct.
- Méthode de mesure sans contact.
- Méthode de mesure mixte.

### III-2.Méthode de mesure par contact direct :

Elle est utilisable généralement dans les parties fixes des machines électriques, elle est basée sur la transmission de l'information de la température par les capteurs avec un contact direct [4]. Cette méthode emploie plusieurs capteurs mais nous avons intérêt aux thermocouples et thermistances.

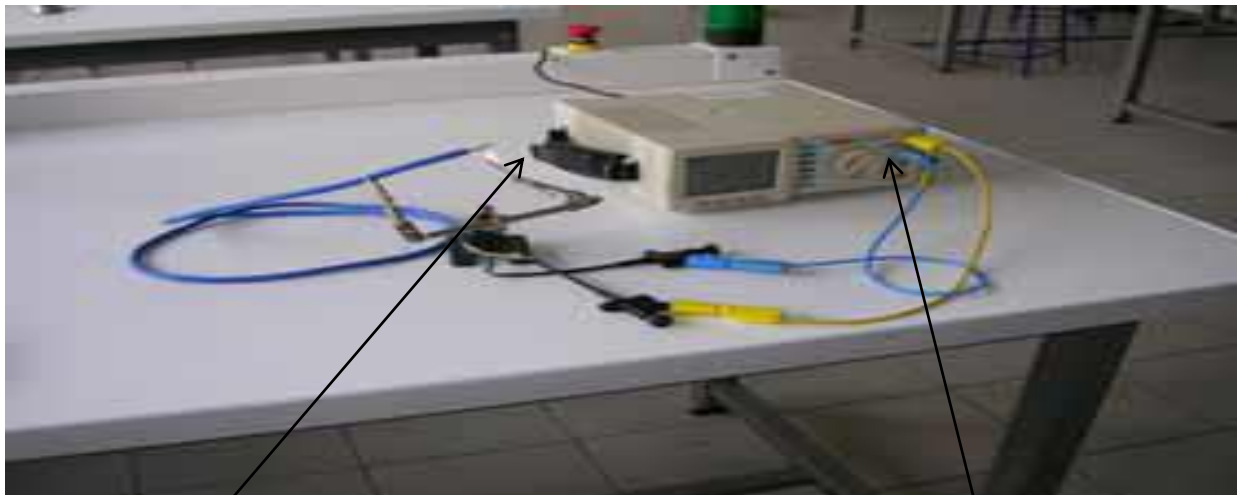
#### III-2-1 : les thermocouples :

Les thermocouples sont durcis, économiques et ils effectuent une large gamme de la température. Ils sont créés lorsque deux fils de métaux différents entrent en contact (soudés) à l'une de leurs extrémités ce qui crée une faible tension aux bornes de l'autre extrémité. Cette jonction est appelée 'jonction chaude' et sera installée dans le milieu dont la température soit mesurée. Les deux autres extrémités sont reliées aux bornes d'un voltmètre, que l'on appelle 'soudures froides'.

Une différence de potentiel est créée pour faciliter sa transformation il est indispensable que les deux 'soudures de référence' se trouvent à la même température. Il faut connaître une température comme la température de la fondation de glace par exemple pour mesurer une température inconnue.

La tension mesurée par le voltmètre est en fonction de la température de la 'soudure chaude' et la température de la 'soudure froide'.

Cette mesure est basée sur le phénomène d'effet Seebeck.



Jonction chaude

micro-ampèremètre

**Fig III-1: photo d'un thermocouple.**

➤ **Effet Seebeck :**

L'effet Seebeck se manifeste par l'apparition d'une force électromotrice (FEM) ou la tension induite par la différence de la température de plusieurs corps conducteur tout au long du fil. C'est aussi la base de la génération d'électricité par effet thermoélectrique, on appelle la sensibilité thermoélectrique la variation de force électromotrice par rapport à une variation d'une température, cette variation est globalement une fonction non linéaire de la température [7].

Pour linéariser cette fonction on s'intéresse à des petites variations de la température sur un conducteur. La formule qui met en relation la variation de la température et de la tension induite est :

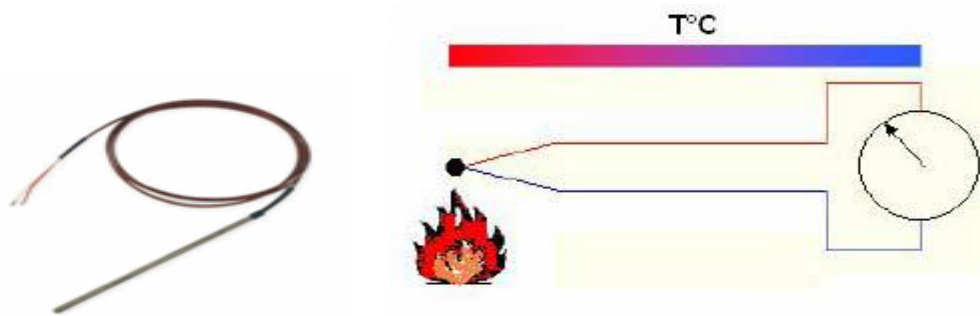
$$\Delta T = S \Delta V \quad (\text{III-1})$$

$\Delta T$  : La variation de température.

$S$  : le coefficient de Seebeck

$\Delta V$  : La variation de la tension.

Une photo d'un thermocouple et comment le réalise et comme suit :



Thermocouple

réalisation d'un thermocouple.

**Fig III-2 : thermocouple et sa réalisation.**

### III-2-1-1 : température de référence d'un thermocouple :

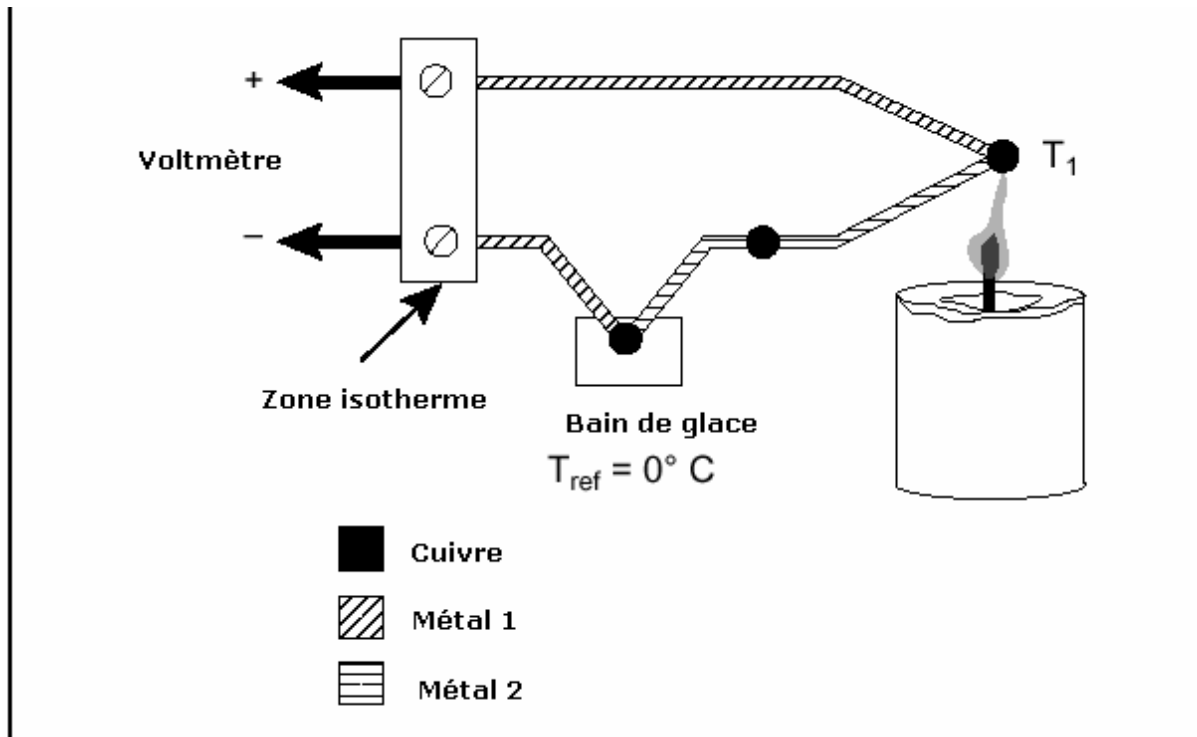
Avant de commencer l'opération de la détermination de la température de la soudure chaude, il est indispensable de connaître la température de la soudure froide qu'on considère comme température de référence.

La tension induite des thermocouples dépend de deux températures celle de la jonction placée au point de mesure qu'on appelle  $T_c$ , et celle de référence aux jonctions formé aux bornes du voltmètre (soudure froide) appelle,  $T_{ref}$  cette dernière se décompose de trois cas :

- ❖ La température de référence nulle,  $T_{ref} = 0$ .
- ❖ La température de référence constante,  $T_{ref} = cst$ .
- ❖ La température de référence variable, généralement  $T_{ref} = T_{amb}$ .

#### 1-Température de référence nulle, $T_{ref} = 0$ :

Dans ce cas la température de référence est celle ou la glace fondante soit  $0^\circ C$ , alors on peut connaître directement la température  $T_c$  à l'aide de table du thermocouple utilisé, ce cas est utilisable avec facilité dans la FEM des thermocouples de la norme ISO.



figIII-3 : réalisation d'un thermocouple.

## 2- La température de référence constante, $T_{ref} = cst$ :

Par raison de sécurité et si la température ambiante risque de dépasser les limites de la plage de fonctionnement,  $T_{ref}$  alors est obtenue à l'intérieur d'un espace chauffé. Cette température est maintenue constante par régulation à une valeur supérieur à l'ambiante, dans ce cas  $T_C$  n'est pas obtenue directement mais elle se calcule par la relation suivante :

$$V_{a/b}^{T_C 0^\circ} = V_{a/b}^{T_C T_{ref}} + T_{a/b}^{ref 0^\circ} \quad (III-2)$$

Ou :

$T_{a/b}^{ref 0^\circ}$  : La mesure de la fem du thermocouple.

## 3 – la température de référence est la même que l'ambiante :

Dans ce cas on procède toujours au calcul, alors connaissant la température ambiante  $T_a$  on calcule comme suit :

$$V_{a/b}^{T_C 0^\circ} = V_{a/b}^{T_C T_a} + V_{a/b}^{T_a 0^\circ} \quad (III-3)$$

Mais il existe une autre méthode qui s'appelle circuit de correction de la soudure froide qui donne la tension  $V(T_a)$ .

## III-2-1-2 : différents types de thermocouples :

Dans un circuit fermé constitué de deux conducteurs de nature différente, il circule un courant lorsqu'on maintient entre les deux jonctions une différence de températures. La force électromotrice qui apparaît dans le circuit dépend de la nature des deux conducteurs et des températures des deux jonctions: celles-ci sont appelées respectivement soudure chaude et soudure froide. Une des Jonctions est en général maintenue à une température de référence (par exemple 0 °C), l'autre sert à capter la température.

Le thermocouple le plus précis est constitué de platine et d'un alliage platine + 10% de rhodium (couple Le Chatelier), la sensibilité est de l'ordre de 10 microvolts par degré.

La tension mesurée depuis le thermocouple est équivalente à la différence entre la tension de Seebeck aux bornes de chaque conducteur.

Cela permet de trouver plusieurs types de thermocouple, désignés par des lettres capitales indiquant leur composition conformément aux conventions ANSI (American National Standard Institute). On donne par exemple un thermocouple de type K qui est constitué d'un conducteur Chromel (alliage nickel + chrome) et un autre d'Allumelle (alliage nickel + aluminium (5%) + silicium). Il permet une mesure dans une gamme de température large : -200 °C à 1250°C. Alors on expose ci-dessous un tableau de différents types de thermocouples.

**Tableau des différents types et de gammes de température et tension :**

Premier métal	Second Métal	Symboles	Type	Limite en °C	Force électromotrice en $\mu\text{V}$
Cuivre (Cu)	Constantan (C)	Cu/C	T	-192 à +400	4277 à 100 °C
Fer (Fe)	Constantan (C)	Fe/C	J	-194 à +870	27390 à 500 °C
Chromel (Cr)	Constantan (C)	Cr/C	E	+1000 °C	37000 à 500 °C
Chromel (Cr)	Alumel (Al)	Cr/Al	K	+1370	41310 à 1000 °C
Platine (Pt)	Rhodium (Rh)	Pt/Rh	SRB	+1700	10450 à 1000 °C

## III-2-1-3 avantages et inconvénient des thermocouples :





### 1- **Avantage :**

- ✓ Faible cout d'achat.
- ✓ Robustesse.
- ✓ Une vitesse de réponse élevée.
- ✓ Pas d'alimentation.
- ✓ Gamme de température très large.
- ✓ Une grande souplesse d'utilisation.
- ✓ Pas d'encombrement.

### 2- **Inconvénients :**

- ✓ Non-linéarité
- ✓ Pas d'amplitude de signale.
- ✓ Correction indispensable pour la soudure froide.
- ✓ Nécessité de connaitre la température de référence.

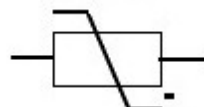
On donne les différents types de thermocouples dans le tableau suivant :

Type Thermocouple Grade	Material		Color Code	Range (°C)	
	Positive Wire	Negative Wire		Minimum	Maximum
J	Iron	Constantan		0	750
K	Chromel	Alumel		-200	1250
T	Copper	Constantan		-200	350
E	Chromel	Constantan		-200	900

## III-2-2 les thermistances :

### III- 2-2-1 : constitution et principe :

Une thermistance C.T.N (coefficient de température négatif) est un élément de détection de température, réalisé à partir d'un matériau semi-conducteur (ex : manganèse Nickel...). Sa résistance diminue de manière uniforme lorsque la température augmente et vice-versa. Son principe de fonctionnement est simple : plus la température est faible plus la résistance diminue [6]. C'est pourquoi il y a différents modèles de résistances. A plus de 200 degrés la C.T.N n'est plus efficace. Son symbole est :



### ✓ Caractéristique de résistance en fonction de la température :

Il existe une relation entre la résistance de la thermistance et la variation de la température qui est défini généralement par l'équation de Steinhart-Hart suivante :

$$\frac{1}{T} = a + b \ln(R) + c \ln(R)^3$$

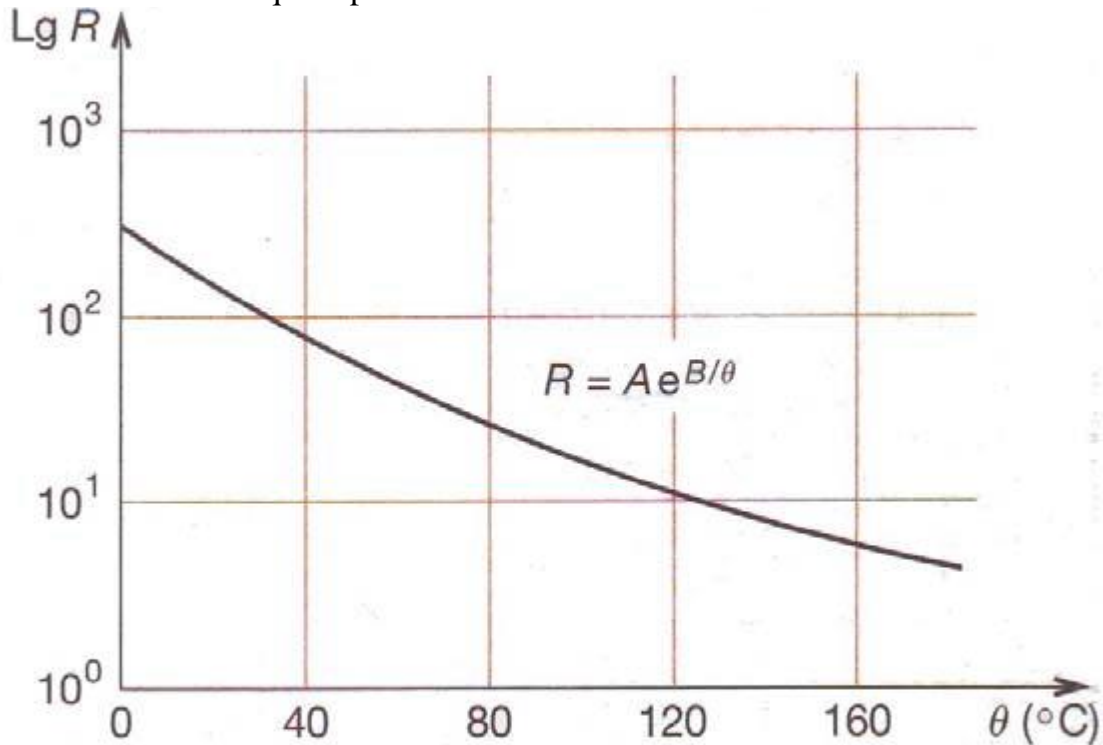
Ou :

a, b et c sont des constantes fournies par le fabricant de thermistance.

T : la température en degrés ou en kelvin.

R : résistances de thermistance en ohm.

On donne une courbe qui exprime cette relation :



**Fig III-4 : la variation de la résistance en fonction de la température.**

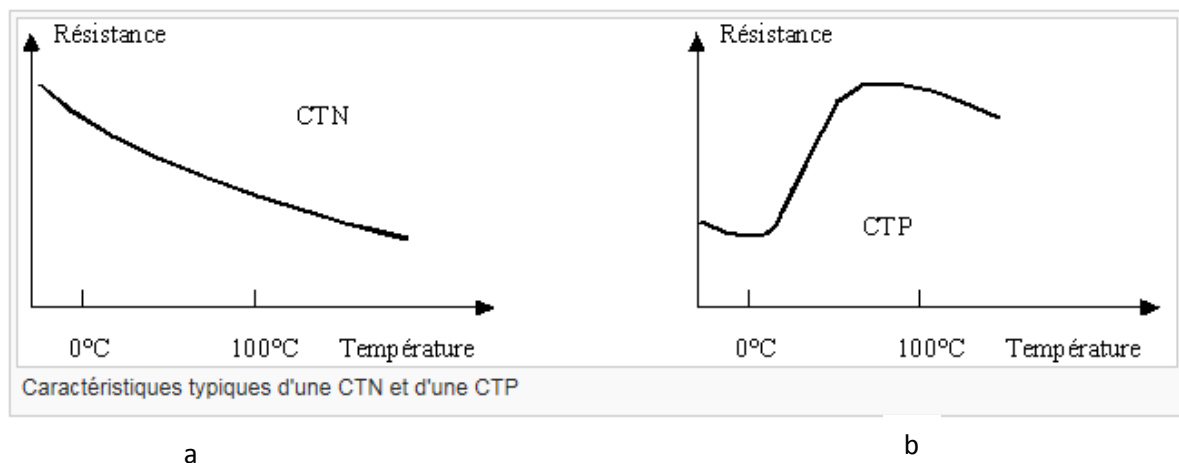
La caractéristique la plus importante est le coefficient de température des thermistances (positif ou négatif), car c'est lui qui détermine le sens de la courbe montante ou descendante, alors on trouve deux types de thermistances :

- **CTN :**

Les CTN sont utilisées notamment pour les mesures, le contrôle et surveillance de la température en milieux gazeux et aquatiques, Limiter l'appel du courant, les composant principaux de ce type le NIO, MnO et Fe<sub>2</sub> et ont une constitution cristalline. Si le coefficient est négatif ça donne la courbe (a).

- **CTP :**

Les résistances de type platine ont l'avantage d'une très bonne reproductibilité et une bonne précision absolue. Elles sont "presque" linéaires entre 0 et 100°C. Ce type est basé autour du groupe cristallin  $BaTiO_3$  en plus des éléments de terre rares comme  $Y_2O_3$  pour contrôler la valeur atomique. Le coefficient de température négatif donne la courbe (b).



**Fig III-5 : caractéristique typique d'une thermistance CTN et CTP**

### III-2-2-2 avantages et inconvénient des thermistances :

#### 1-les avantages :

- la précision : cette précision arrive jusqu'à  $\pm 0,1^\circ$
- stabilité : elles ne sont pas affectées sérieusement par le vieillissement.
- Dimension : sa dimension réduite permet a des mesures ponctuelle de la température.

#### 2- les inconvénients :

- une plage de fonction réduite de  $-80^\circ c$  à  $+120^\circ c$ .
- non linéarité.
- alimentation indispensable
- échauffement du capteur à cause du courant.

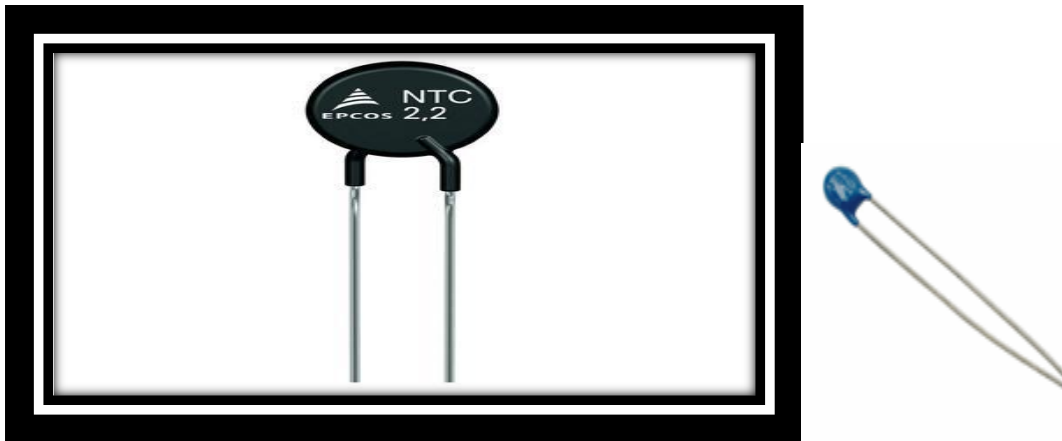


Fig : III- 6 : photos des thermistances

**III-3 comparaison entre les thermocouples et les thermistances utilisée :**

Pour faire le choix sur lesquelles des capteurs de températures on va choisir et on va faire une petite comparaison entre les thermocouples et les thermistances dans le tableau suivant :

Caractéristique	thermistances	thermocouples
Précision	plus précis	pas précis
Encombrement	existe	moyen
Reproductibilité	bonne	moyen
Alimentation	indispensable	n'est pas indispensable
Sensibilité	peu	très sensible
Stabilité	oui	non
Gamme de température	réduite	large
Échauffement	oui	non
Coût	plus cher	pas cher
Temps de réponse	lent	rapide

**Tableau III-7 : Comparaison des caractéristiques principales des thermocouples et des thermistances.**

**III-3 Méthode de mesure de température sans contact :**

Il y a des cas où le contact n'est pas possible entre l'élément sensible et le point de mesure alors pour transmettre l'information de la température on est obligé d'utiliser les méthodes sans contact :

- Pyrométrie
- Caméra thermique

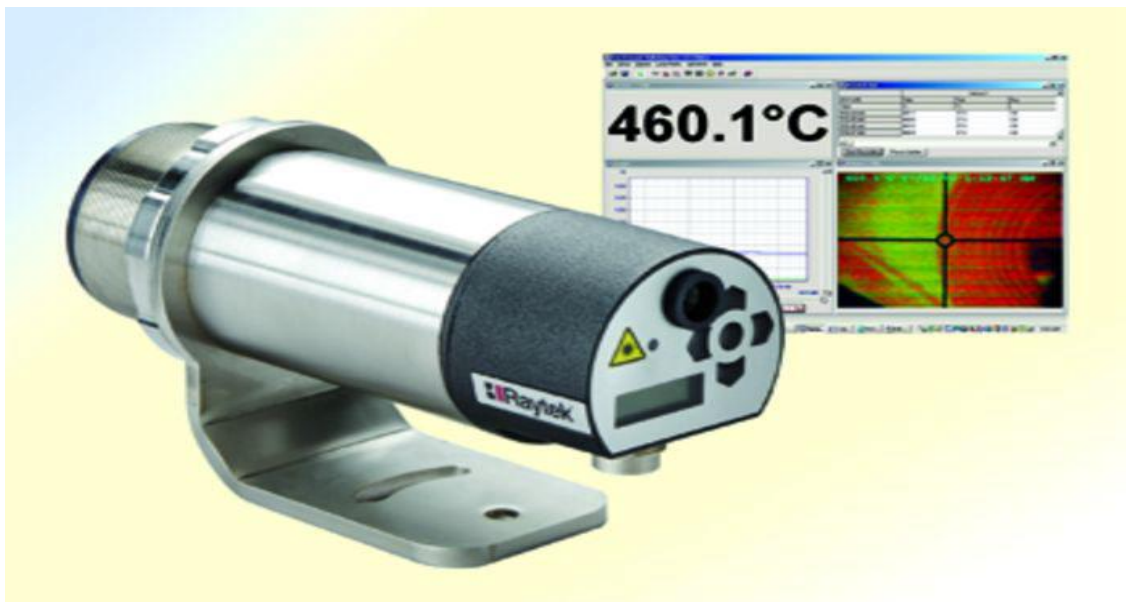
### III-3-1 pyrométrie optique :

Le pyromètre optique est un instrument qui consiste à mesurer la température d'un objet du rayonnement qu'il émet. Sa précision et sa sensibilité sont fortement améliorées.

On l'appelle aussi thermomètre infrarouge car son fonctionnement est basé sur la mesure de rayonnement dans le domaine de l'infrarouge comme on utilise également la pyrométrie infrarouge pour mesurer les températures élevées des objets, le four par exemple [6].

Il existe plusieurs types de pyromètres optiques selon leurs principes de fonctionnement et on distingue les pyromètres suivants :

- Les pyromètres monochromatiques.
- Les pyromètres bichromatiques.
- Les pyromètres mesureurs d'énergie.



**Fig III-8 : Photo d'un PYROMETRE OPTIQUE**

### III-3-2 principe physique :

Contrairement aux autres types de thermomètres classiques la pyrométrie optique peut mesurer la température à distance ou si l'objet est en mouvement à condition qu'il sera entouré d'un champ électromagnétique, car il est basé sur la quantification de l'énergie radiatif émise dans l'infrarouge qui est émet par tout l'objet inférieur strictement à 0 k, le paramètre principal de ce type est l'émissivité qui dépend, de plusieurs facteurs qui sont :

- La température
- La direction du rayonnement
- La longueur d'onde
- De la nature des matériaux employés

Qui sera toujours inférieure à 1 dans le cas du corps réel, donc l'énergie lumineuse mesurée sera convertie à un signal électrique.

### III-3-3 application du pyromètre infrarouge :

Ce capteur est spécifié pour les applications qui exigent des temps de réponse très court, les mesures de grande précision ainsi que les objets en mouvement difficilement accessible ou très chaud comme :

1. Le contrôle de la température d'un équipement, un four par exemple.
2. Contrôle de produits alimentaires sous emballage.
3. Détection de nuages pour les télescopes.
4. Il permet une surveillance dans une large gamme de température sans modification de la nature des objets à mesurés.
5. son emploi peut se faire dans des environnements difficiles.
6. Sa facilité d'emploi.
7. sa précision et sa fiabilité.
8. Détection des zones chaudes lors des incendies.

### III-4 caméra thermique :

Une caméra thermique est un outil de mesure qui enregistre les différents rayonnements infrarouge émis par le corps et qui vient en fonction de leur température.

Elle détecte et met en images des phénomènes invisibles à l'œil nu comme la chaleur emmagasinées par un corps ou montre le flux thermique d'une paroi en raison d'un foyer se trouvant à l'arrière.

La caméra thermique à un principe simple ou elle se base sur un seul canal comme la camera normal qui filme en noir et blanc. L'image de l'intensité du rayonnement permet d'apprécier la température de la source, chaque image de température correspond à une température parce que l'image obtenue par la camera à une fausse couleur.



**Fig III-9 : Photo d'une caméra thermique et d'une image produite**

### **III-4-1 avantages et inconvénients de caméra thermique :**

#### **a- Avantage :**

- Mesure possible des objets en mouvement.
- Possibilité de mesurer avec grande distance.
- Mesure des tensions très minimales.
- Temps de réaction et de mesure très courts
- Mesure sans effet rétroactif.
- Aucune influence de l'objet à mesurer.
- Mesure non destructive.
- Longévité du point de mesure, aucune usure.

#### **b- Inconvénients :**

- Il ne permet pas de voir les informations en profondeur.
- Elle n'indique pas la température thermodynamique.

### **III-5 : conclusion :**

Pour l'indisponibilité de l'étude thermique expérimentale, dans notre travail on a basé dans ce chapitre sur les différents moyens utilisés pour mesurer la température et les méthodes que nous avons utilisé selon les propriétés de la machine et sa sensibilité à la température et on a trouvé deux méthodes :

La méthode directe ou on utilise les capteurs classiques comme les thermocouples et les thermistances mais le problème qu'il faut un contact entre le capteur et le mesurée.

Puis la méthode sans contact avec des pyromètres optiques et caméra thermique qui permet de la résolution du problème de contact et permet la mesure de température quel que soit l'endroit où la partie de la machine.

Alors on va utiliser ces moyens pour étudier la machine dans le prochain chapitre.

# Chapitre IV

## **Etude expérimentale comparaison, et validation.**

### IV-1 Introduction :

Il est important de connaître la température en tout point de la machine, pour améliorer leurs performances.

Pour le cas d'une machine déjà construite il est impossible de placer les capteurs dans certains endroits comme l'encoche par exemple, pour cette raison dans notre étude on se sert d'un stator creux pour l'étude expérimentale et d'une simulation à l'aide d'un logiciel FEMM.

Premièrement on présente le logiciel utilisé et on réalise les tests préliminaires car ils sont indispensables dans l'étude expérimentale.

Puis des essais de mesures de températures dans l'encoche de stator creux sont réalisés pour obtenir des résultats, les présentes, interprétés et comparés avec les résultats obtenus par la modélisation thermique par le FEMM.

### IV-2 Présentation de l'outil de calcul logiciel FEMM :

Notre travail peut être programmé en utilisant des logiciels comme Matlab, Maple ou Fortran. La programmation de la méthode nécessitera un temps considérable pour son exploitation dans la conception des machines asynchrones à cage d'écureuil.

Pour cela, les calculs dans ce mémoire, sont effectués à l'aide d'un logiciel 2D désigné par FEMM (Finite Element Methode Magnetics).

Comme tous les logiciels d'éléments finis en deux dimensions, FEMM s'articule sur trois axes appelés "pré-processeur", "processeur" et "post processeur".

Dans le but de faciliter l'étude de la machine asynchrone à cage d'écureuil, Les problèmes thermiques résolus par FEMM sont des problèmes en régime établi du transfert de chaleur par conduction avec des conditions limites qui peut être une température ou un coefficient de convection.

Ces problèmes sont présentés par un gradient de température et densité de flux. Cette dernière est régit par la loi de gausse :

$$\nabla F = q \quad (\text{IV-1})$$

F : la densité de flux de chaleur.

q : la production volumique de chaleur.

### **Pré-processeur :**

Cet élément permet de définir la machine à étudier à savoir :

- ✓ Dessiner la géométrie de la machine avec des arcs ou des segments de droite.
- ✓ Définition du problème, à savoir la nature du problème à résoudre (la fréquence, l'unité des grandeurs géométriques, la précision du calcul). Nous pouvons également définir la finesse du maillage.
- ✓ Introduction des caractéristiques des différentes régions géométriques de la structure (propriétés magnétiques des matériaux ou thermiques).
- ✓ Définition des circuits de la structure. Cette partie nous donne aussi la possibilité d'introduire le nombre de spires dans les bobinages ainsi que la valeur des courants.
- ✓ Introduction des conditions aux limites.

### **Le processeur :**

Cet élément effectue la résolution du problème défini sur chaque élément de maille processeur (le cas non linéaire). En régime linéaire, la résolution du système d'équations s'effectue en une seule itération par une méthode directe. En chaque élément, le potentiel vecteur est déterminé et à partir de là, les autres grandeurs sont déduites.

### **Le post-processeur :**

Une fois les résultats sont déterminés par le processeur, le post-processeur nous permet de les visualiser et récupérer les valeurs des grandeurs désirées (les flux d'encoches, les valeurs de la température, grandeur de densité de flux de chaleur, grandeur de champ de gradient) sous forme de mode mathématique (courbe).

### **IV-3 présentation de stator creux :**

On est dans l'obligation d'utiliser un stator creux pour remédier au problème de placement des capteurs dans l'encoche d'une machine déjà construite, ce stator aux caractéristiques suivantes :

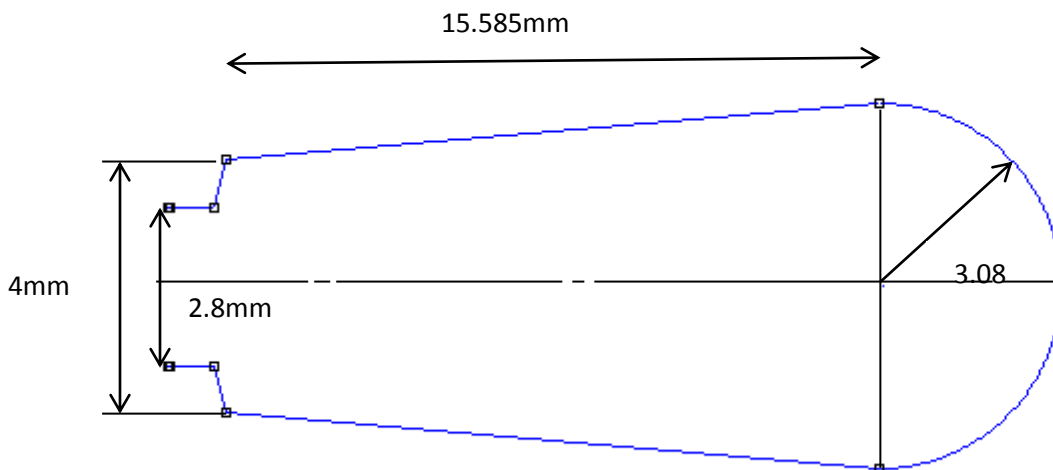
- Tôles : type 106/4 870-400-0010.
- Diamètre extérieur : 170mm.
- Diamètre intérieur : 115mm
- Longueur de paquet de tôles : 90mm.
- Nombre d'encoches : 36.

On donne la photo du stator étudié dans le laboratoire de département :



**Fig IV -1 : photo de stator met en essai.**

Les dimensions de l'encoche statorique du stator étudié sont représentées sur la figure suivante :



**Fig IV -2 : les démenions de l'encoche étudiée.**

### IV-4 description du banc d'essai :

On utilise le matériel suivant pour mesurer la température du stator met en essai :

- ✓ Source de tension de 380V.
- ✓ Source de tension de 220 V
- ✓ Un autotransformateur considéré comme une source de tension et de courant variable (0-250 V) et (0-20 A).
- ✓ Appareil de mesure : ampèremètre, voltmètre, wattmètre, chronomètre.
- ✓ Capteurs de température : thermocouples et caméra infrarouge thermique .
- ✓ Eco pointeur
- ✓ Les fils électriques.
- ✓ Papier isolant.
- ✓ Un rotor à cage.
- ✓ Fil de cuivre pour le bobinage de diamètre  $\phi = 0,71\text{mm}$ .

### IV-5 : Etude du stator creux :

#### IV-5.1 : Emplacement des capteurs dans l'encoche et essais :

Avant le montage on place le capteur TH1 au fond de l'encoche, et le capteur TH2 au milieu entre les fils d'une section et TH3 on le place sur la tête de la bobine.

Après on réalise le montage suivant avec une source monophasé qui alimente les bobines  $V_1$  et  $V_2$  on utilise les appareils de mesures nécessaires pour les relevés. Cet essai est sur le stator creux sans rotor et on relève les résultats suivants avec  $I= 3\text{A}$  dans l'ampèremètre,  $V=52\text{V}$  dans voltmètre et  $P=110\text{W}$  dans le wattmètre.

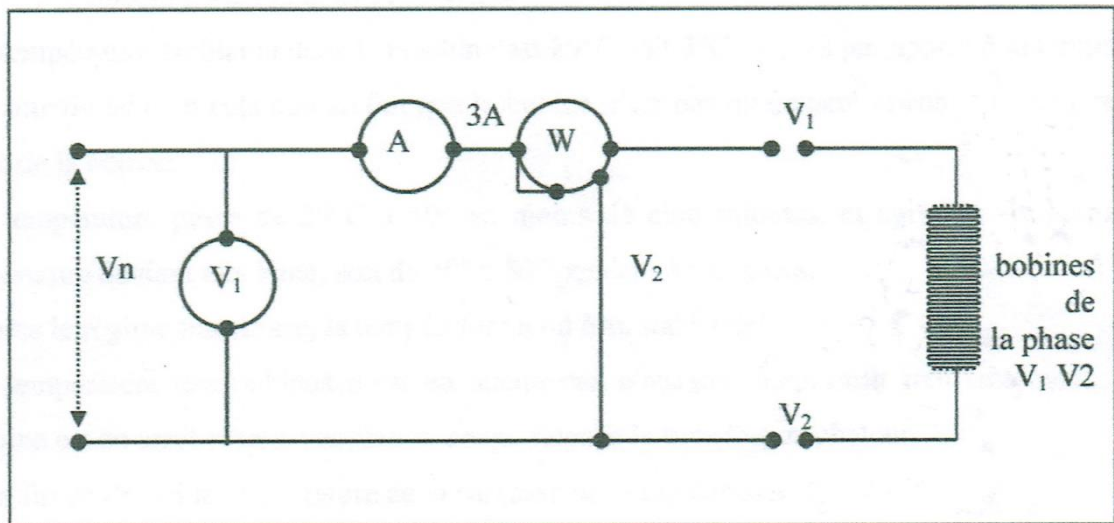
Avec l'ohmmètre on trouve  $R=9.75 \Omega$  à  $30^\circ$

$$R_{T_2} = R_{T_1} * \frac{273+T_2}{273+T_1} \quad (\text{IV-2})$$

Donc à  $100^\circ$  on trouve :  $R_{100^\circ}=9.75 * \frac{273+100}{273+30} = 12\Omega$

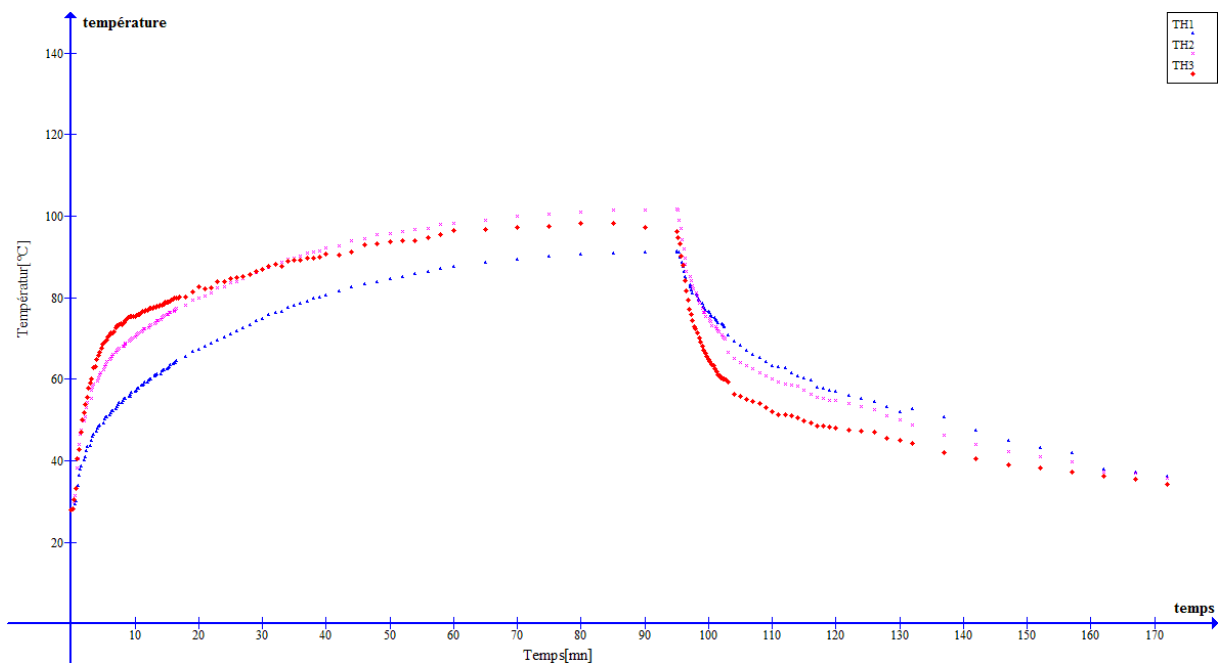
Les pertes joules  $P_j=R*I^2 =12*9=108\text{W}$ .

Et  $P_f = 110 - 108 = 2 \text{ W}$ .



**Fig IV -3 : schéma de montage d'une phase.**

Puis on obtient la courbe de température suivante :



**Fig IV 4 : résultats obtenu du stator**

### IV-5.2 : Observation et interprétation des résultats :

- La température ambiante au labo le jour de l'essai est  $T_a = 31^\circ\text{C}$ , les capteurs affichent de  $28^\circ\text{C}$  près est ça avant l'alimentation de stator. Parce que l'éco-

pointeur présente une erreur avant l'échauffement des conducteurs du capteur, mais cette erreur disparaît dès que l'appareil se chauffe.

- Les points de départ des courbes TH1, TH2, TH3 sont à 27°C près
- La température passe de 28°C à 70°C en moins de dix minutes, et après la variation de la température devient très lente, de 70°C à 100°C pendant 90mn.
- Après le régime transitoire, la température tend à se stabiliser.
- La température ne se stabilise pas car le stator est sans ventilation ce qui ralentit le transfert de la chaleur.
- Après 100 mn la température commence à descendre car l'alimentation de stator est coupée (étape de refroidissement).
- La chaleur est plus importante dans le milieu de l'encoche et la tête de bobine qu'au fond de l'encoche.
- La tête de bobine est plus chaude au début de l'essai, mais à partir de la 30<sup>ème</sup> minute (90°C près) on voit le croisement avec la température de milieu d'encoche et à la fin de l'essai on trouve cette dernière le lieu le plus chaud du stator.
- L'augmentation de la chaleur se produit plus vite dans le milieu de l'encoche que dans le fond et la tête de bobine ce qui explique la grande différence qui existe entre elles.
- La courbe de la tête de bobine est due en fait qu'elle est en dehors du stator donc elle est influencée par les conditions extérieures qui ne sont pas stables (courant d'air par exemple).

### IV-5.3 : résultats obtenus par caméra infrarouge :

Puis on visualise la température du stator avec la caméra infrarouge et on obtient les résultats suivants :

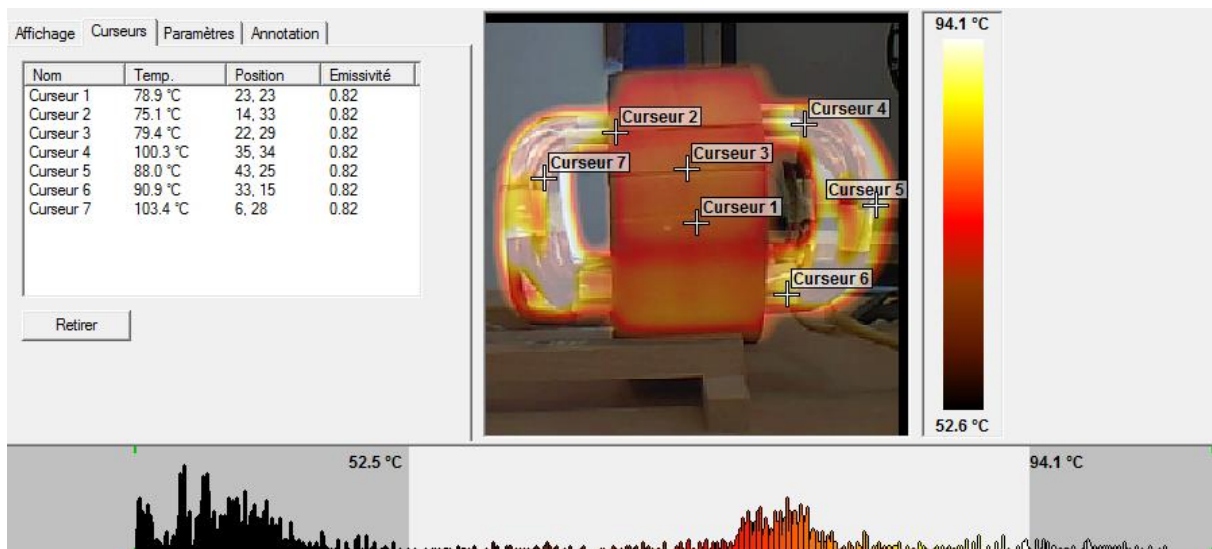
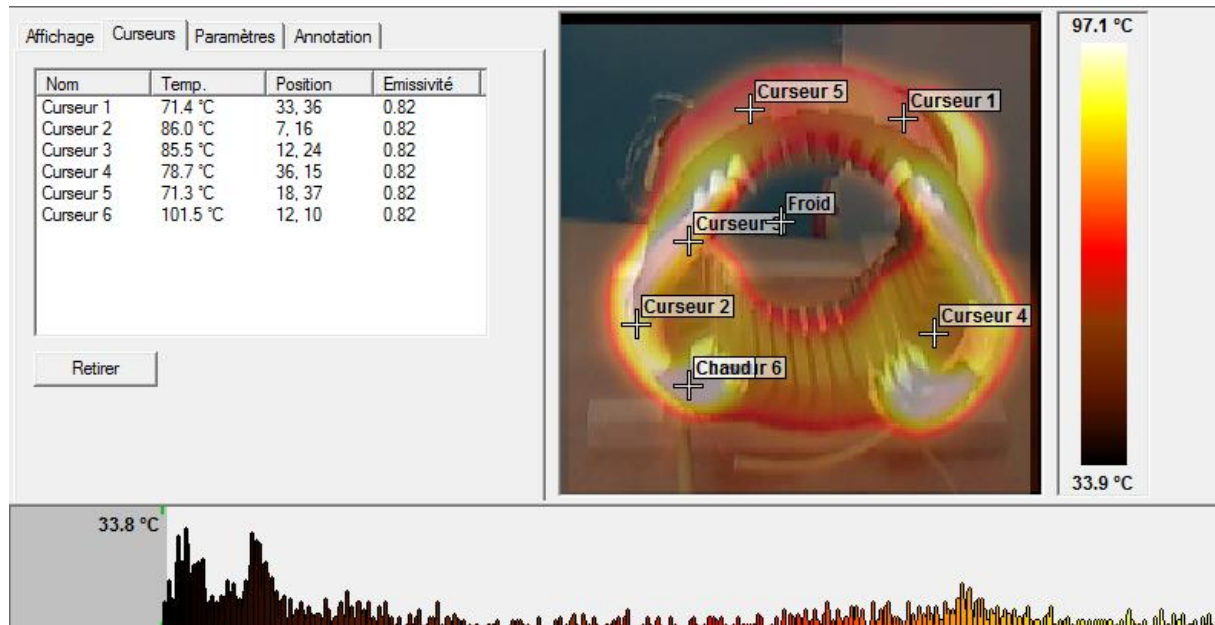


Fig IV 5: Photo de stator avec caméra infrarouge.



**Fig IV 6 : photo radiale du stator avec la caméra infrarouge.**

De ces visualisations on remarque :

- ❖ pas de grande différence entre la partie où il existe les bobines et les parties vides.
- ❖ La température à l'extrémité est inférieure par rapport aux autres parties du stator.
- ❖ Il existe une légère différence entre la température trouvée en expérience et la température captée par la caméra infrarouge.

#### IV-5.4 Présentation de la structure étudiée

Le stator étudié correspond à un stator d'une machine asynchrone à cage d'écureuil triphasée.

Ces grandeurs nominales et ses dimensions géométriques sont données ci-dessous.

Son diamètre extérieur est de 170 mm et diamètre intérieur est de 115mm.

Elle possède deux paires de pôles. La coupe transversale du stator montre ses différentes parties.

Celle-ci est constituée :

- Un stator cylindrique en tôles à 36 encoches, comportant un enroulement à une seule couche.

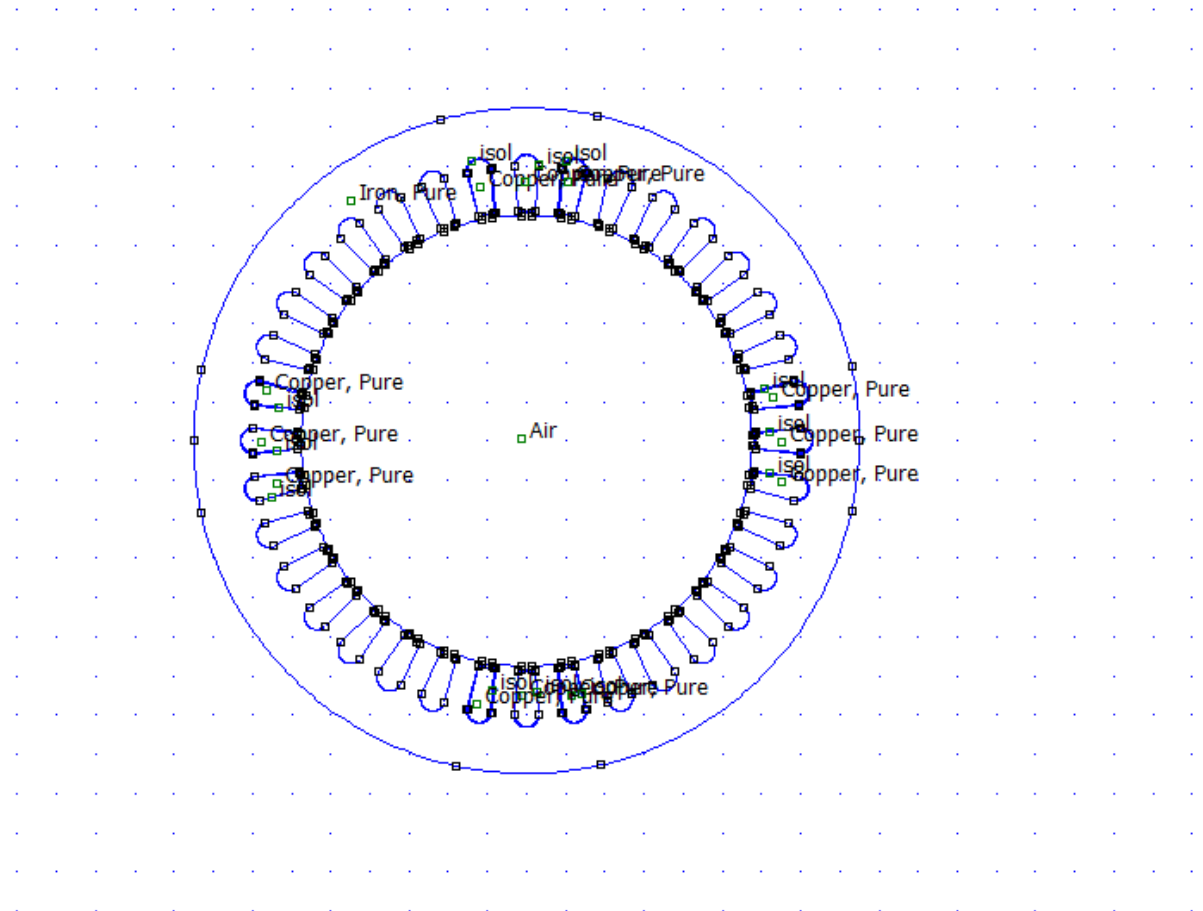
- Un bobinage sur une phase.

### IV-5.5 : dimensionnement géométrique du stator sous FEMM :

On a imposé un point (0,0) comme une référence et pour tracer le contour du stator avec les deux points (-85, 0) et (85, 0), puis on a dessiné les points (57,47 ; 1.39),(58,28 ;1,39),(58,48 ;2,2),(69,93 ;3,2),(69 ,93 ;-3,2),(58,48 ;-2.2),(58,28 ;-1.39),(57.47 ;-1.39) pour qu'on puisse dessiné l'encoche puis on duplique 35 fois pour avoir 36 encoche au stator espacé de  $10^\circ$  et on réduit les encoche de 1.8 mm pour avoir l'isolation.

### IV-5.7 résultats de la modélisation par FEMM :

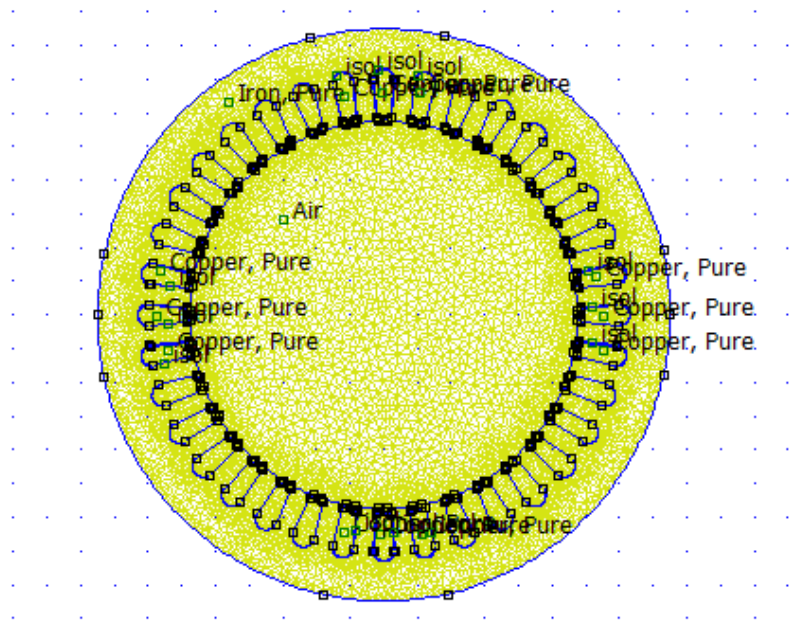
Après on trouve la structure suivante :



**Fig IV-7: modélisation sous FEMM du stator a étudié.**

Puis nous avons ensuite défini toutes les propriétés des matériaux, leur conductivité thermique suivant les différents axes.

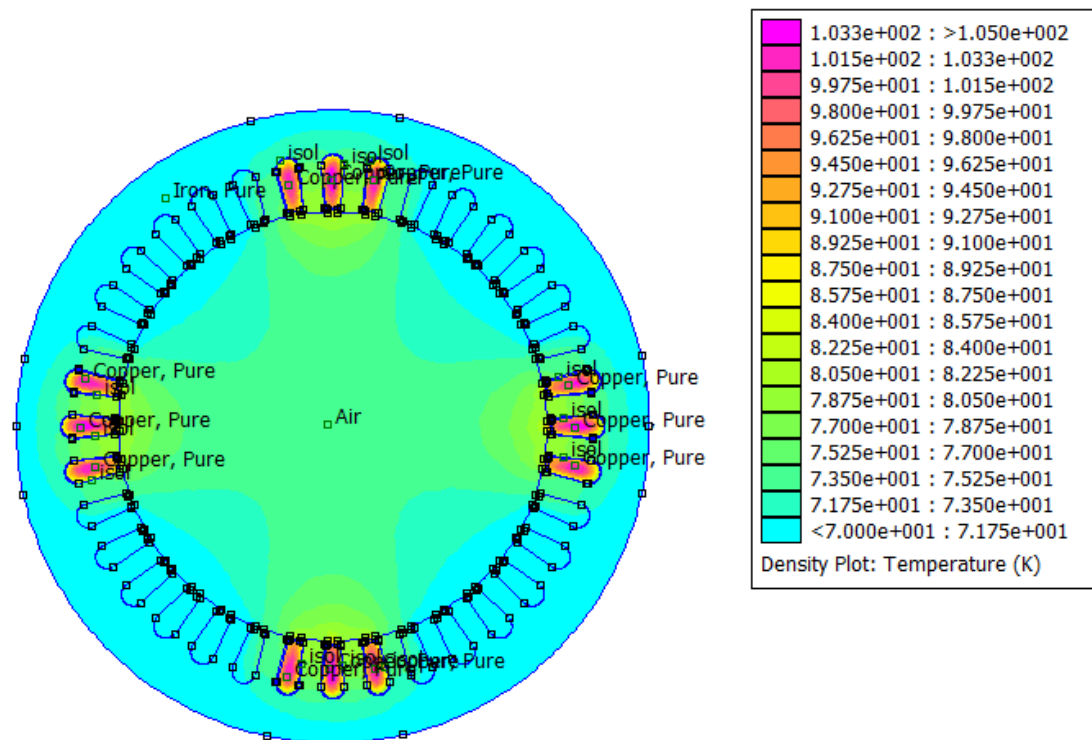
Pour la détermination de densité des pertes nous avons calculé le volume et les pertes dans les différentes parties.



**Fig : IV-8 : structure maillée du stator étudié.**

Les résultats obtenus du maillage sont les suivantes :  
110149 nœuds, 219932 éléments et une précision de  $10^{-8}$ .

L'influence des bobines et la répartition de la température dans le stator sont données sur la figure suivante :



**Fig IV-9: répartition de la température sous FEMM.**

On remarque qu'il n'y a pas de grande différence en point de vue température entre les résultats des deux méthodes précédente et le résultat de la modélisation.

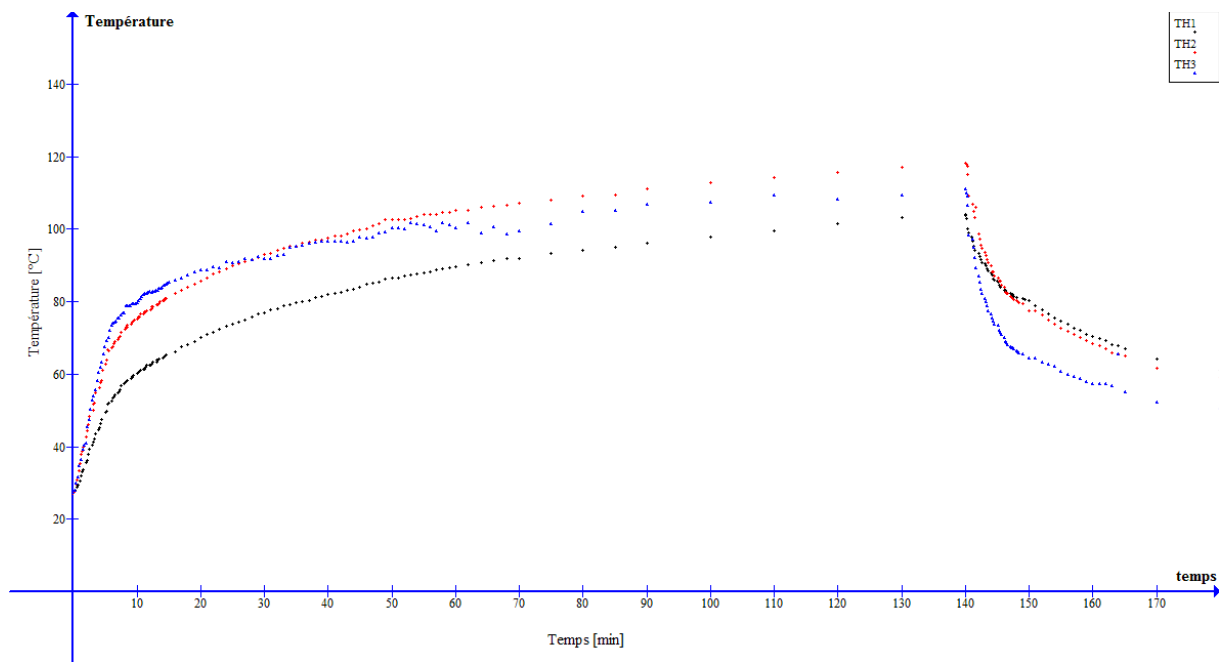
### IV-6 Etude du stator avec rotor :

On ajuste un courant de 3A, le stator est alimenté par une source monophasée (on utilise un autotransformateur) alors on relève une tension de 82 V de voltmètre et une puissance consomme de 160 W de wattmètre. (Dans cet essai on met le rotor dans le stator creux).

$$R_{30^\circ} = 9.75\Omega \text{ et } R_{120^\circ} = 9.75 * \frac{120+273}{30+273} = 12.64\Omega.$$

$$\text{Donc } P_j = R * I^2 = 12.64 * 9 = 113.81W.$$

Puis on relève les valeurs des températures des trois thermocouples et les instants correspondants à ces valeurs.



**Fig IV-10: variation de la température dans une encoche statorique.**

### IV-6.1 : Observations et interprétation des résultats :

- La température ambiante au labo le jour de l'essai est  $T_a=30^{\circ}\text{C}$ , les capteurs affiches de  $27^{\circ}\text{C}$  près est ça avant l'alimentation de stator. Parce que les thermocouples présentent une erreur avant l'échauffement des conducteurs du capteur.
- Les points de départ des courbes TH1, TH2, TH3 sont à  $27^{\circ}\text{C}$  près.
- La température passe de  $27^{\circ}\text{C}$  à  $80^{\circ}\text{C}$  en moins de dix minutes, et après la variation de la température devient très lente, de  $80^{\circ}\text{C}$  à  $120^{\circ}\text{C}$  pendant 120mn.
- Après le régime transitoire, la température tend à se stabilise.
- La température ne se stabilise pas car le stator est sans ventilation ce qui ralentit le transfert de la chaleur.
- Après  $140^{\text{eme}}$  mn la température commence à descendre car l'alimentation de stator est coupée (étape de refroidissement).
- La chaleur est plus importante dans le milieu de l'encoche et la tête de bobine qu'au fond de l'encoche.
- La tête de bobine est plus chaude au début de l'essai, mais à partir de la  $30^{\text{eme}}$  minute ( $90^{\circ}\text{C}$  près) on voit le croisement avec la température de milieu d'encoche et à la fin de l'essai on trouve cette dernière le lieu le plus chaud du stator.
- L'augmentation de la chaleur se produit plus vite dans le milieu de l'encoche que dans le fond est la tête de bobine ce qui explique la grande différence qui existe entre eux.
- La courbe de la tête de bobine est due en fait qu'elle est en dehors de stator donc elle est influencé par les conditions extérieurs qui ne sont pas stable (courant d'air).

## Chapitre IV : Etude expérimentale, comparaison et validation

- La chaleur est plus importante dans ce cas par rapport au stator creux car il existe des pertes dans le rotor qu'on ne peut pas les négliger.

### IV-6.2 : Mesure de la température par une caméra infrarouge :



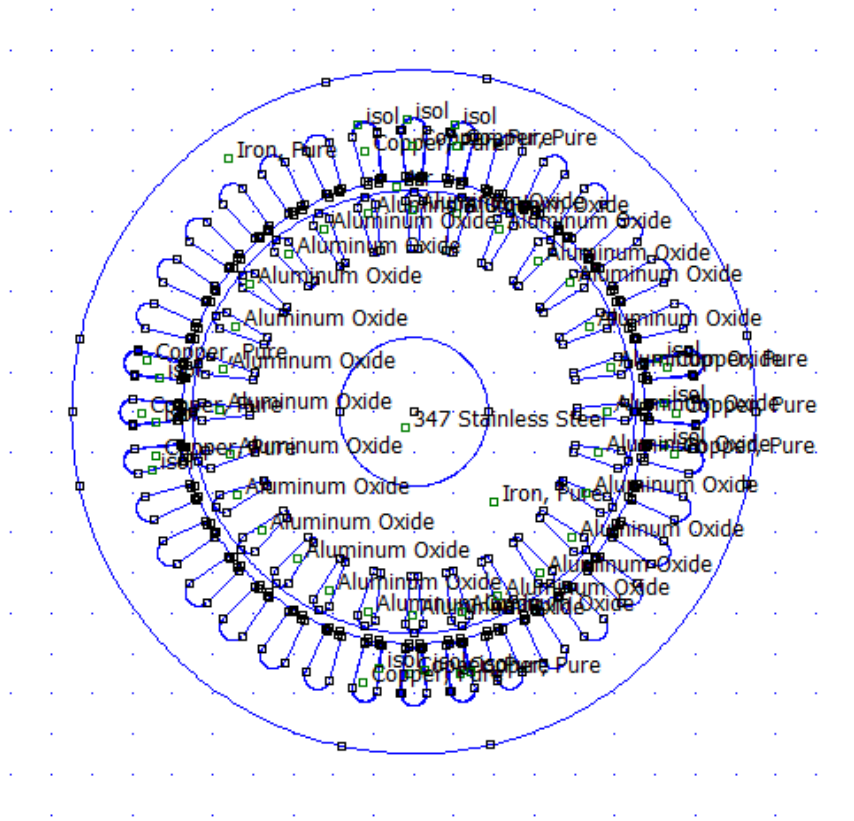
**Fig IV 11 : photos de la variation de la température avec rotor.**

Il existe une différence entre la lecture sur les capteurs et l'affichage de la caméra infrarouge. Ça est expliqué par le placement de capteur entre les fils alors que la caméra mesure sur la surface, et ça dépend aussi de l'angle où on prend la photo.

### IV-6.3 : résultats du modélisation par FEMM :

Puis on passe à la modélisation du système, on a tracé l'arbre du rotor et le rotor avec le même principe que le stator sauf que les encoches rotorique sont dupliquées par 27 fois (l'angle qui sépare les encoches est de  $12.85^\circ$ ). Son diamètre extérieur est de 110 mm et sa longueur utile est de 160mm.

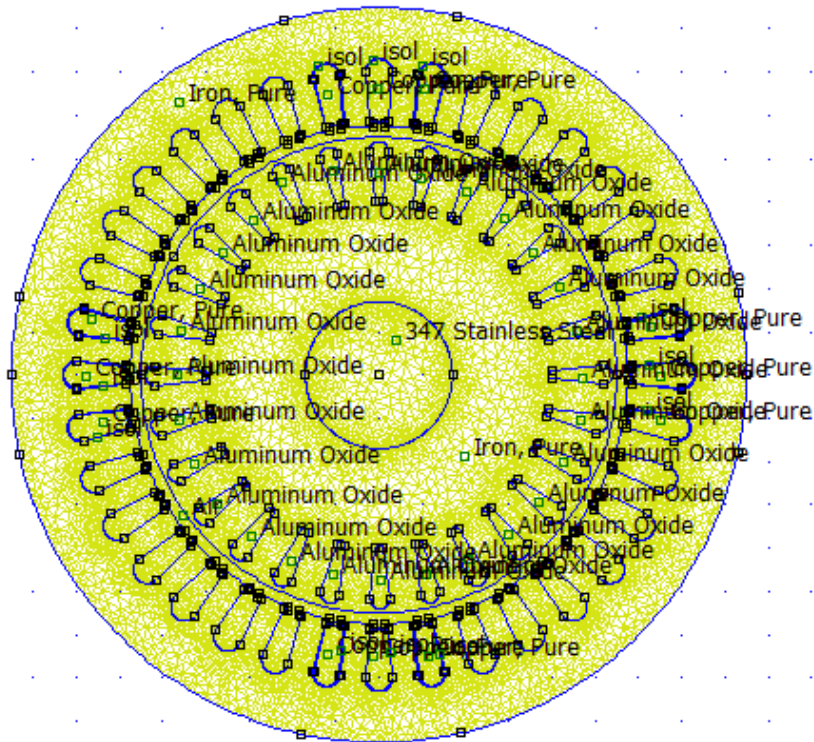
La coupe transversale démontre les différentes parties du stator creux.



**Fig IV-12 : modélisation sous FEMM du stator étudiée avec rotor.**

Avec cette structure on peut visualise beaucoup de choses comme la distribution de la température, le flux et le gradient de température mais nous, on va se base sur la distribution de la température à cause de son importance dans notre étude

On commence par la structure maille du cette essai :



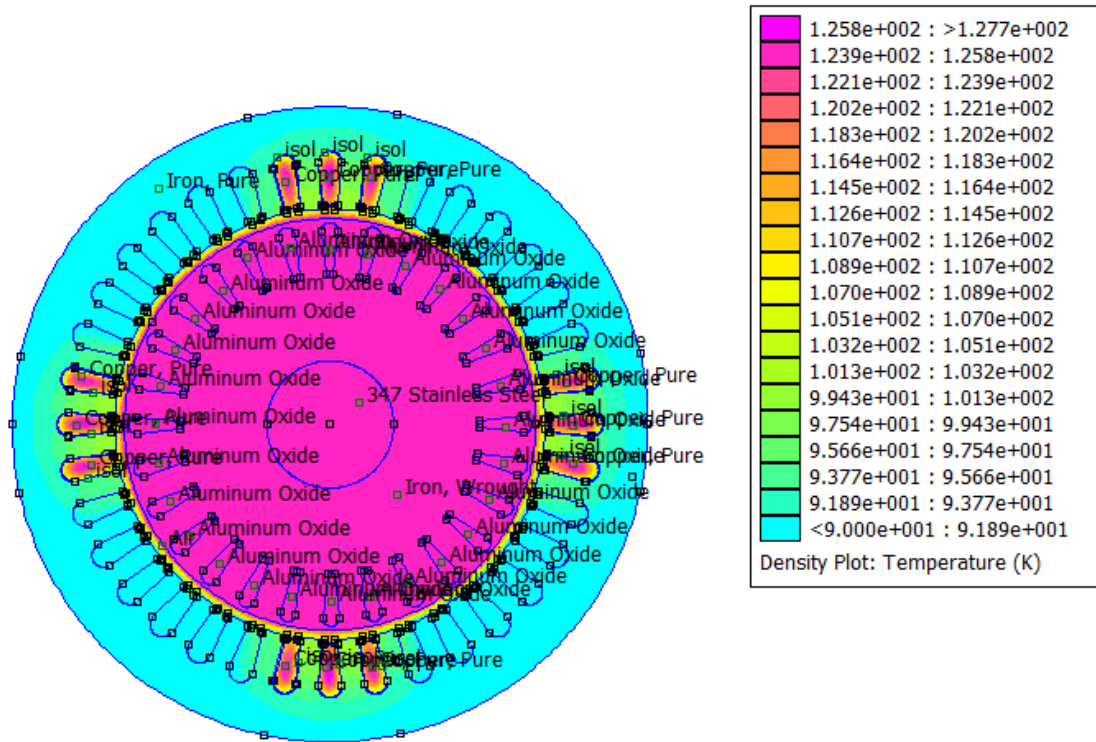
**Fig IV -12 : structure maille du stator avec rotor.**

Les résultats obtenus du maillage sont les suivantes :

184050 nœuds, 367734 éléments et une précision de  $10^{-8}$ .

L'influence des bobines et la répartition de la température dans la machine

Puis on obtient la distribution de température suivante :



**Fig IV-14: distribution de la température avec rotor.**

On a la même structure mais dans cette étape on va baser notre étude sur le domaine magnétique de la machine, et cela pour déterminer les pertes fer dans le stator, alors on va utiliser trois méthodes différentes (analytique, par expérience et par modélisation).

**IV-7 Méthode analytique pour le calcul des pertes dans le stator creux :**

**IV-7-1 : Calcul de l'induction  $B_\sigma$  :**

$$B_\sigma = \frac{0.225 \cdot 2P \cdot U \cdot 10^6}{L \cdot D \cdot w_1} \tag{IV-3}$$

$$B_\sigma = \frac{0.225 \cdot 4 \cdot 52 \cdot 10^6}{9 \cdot 11.5 \cdot 384} = 1177.35 \text{G} = 0.11 \text{T}$$

**IV-7.2 Calcul des pertes des dents et de la culasse statorique :**

**Calcul de l'induction de la culasse :**

$$B_{c1} = 0.5 \frac{\alpha_i \cdot \tau_p \cdot B_\sigma}{K_{fer} \cdot h_{c1}} \tag{IV-4}$$

$$h_{c1} = 12 \text{mm}, \alpha_i = \frac{2}{\pi} = 0.64, \tau_p = \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot P} = 90.27 \text{mm}, D_1 = 115 \text{mm}, B_\sigma = 0.11 \text{T}.$$

$$B_{cl} = 0.5 \frac{0.64 * 90.27 * 0.11}{0.97 * 12} = 0.27 \text{ T}$$

➤ **Calcul des pertes dans la culasse statorique :**

Pour évaluer les pertes dans la culasse statorique on multiplie les pertes spécifiques calculées, pour une induction maximale dans la culasse ( $B_{clmax}$ ) par la masse d'acier de la culasse, mais en tenant compte de la magnétisation qui est elliptique sur la frontière avec la couche des dents et pulsatrice sur la périphérie et de l'influence de l'usinage de l'isolation des tôles dans la culasse en introduisant le coefficient de majoration.

Les pertes dans la culasse sont données par:

$$P_{cl} = P_{10} \left( \frac{f_1}{50} \right)^\beta (K_{dc} * B_{clmax}^2 * G_{cl}) \quad (\text{IV-5})$$

$P_{10}$ : les pertes spécifiques, appelées aussi pertes globales ramenées aux kilogrammes des tôles d'acier soumises à une magnétisation pulsatrice à fréquence 50Hz pour une induction de 1T.

$P_{10} = 2.5 \text{ W/KG}$  pour 1T.

$K_{dc}$ : coefficient totale de majoration des pertes tenant compte de l'imperfection de la technologie :  $K_{dc} = 1.7$ .

$B_{clmax}$ : l'induction magnétique maximale dans la culasse du stator :  $B_{clmax} = 0.27 \text{ T}$ .

$f_1$ : fréquence du réseau d'alimentation:  $f_1 = 50 \text{ Hz}$ .

$$\beta = 3/2$$

$G_{cl}$ : le poids total de la culasse, il est donné par la formule suivante:

$$G_{cl} = \pi [D_{ex} - h_{cl}] * K_{fer} * l_i * h_{cl} * \gamma_c * 10^{-9}. \quad (\text{IV-6})$$

Alors :  $\gamma_c = 7.8 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$

$D_{ex} = 170 \text{ mm}$ ,

$h_{cl} = 112 \text{ mm}$

$K_{fer} = 0.97$ ,

$l_i = 90 \text{ mm}$ .

$$G_{cl} = 3.14 * (170 - 12) * 0.97 * 90 * 12 * 7.8 * 10^3 * 10^{-9} = 4.05 \text{ Kg}.$$

$$P_{cl}=2.5 * 1\frac{3}{2} * 1.7 * 0.27^2 * 4.05 = 1.25 W.$$

- **Induction des dents statoriques :**

$$b_{z1max} = \frac{t_1 * B_{\delta}}{K_{fer} * B_{z1}} \quad (IV-7)$$

$$t_1 = \frac{\pi D}{z_1} = \frac{3.14 * 115}{36} = 10.53$$

$$b_{z1max} = \frac{10 * 0.11}{0.97 * 5.5} = 0.2 T$$

- **Calcul des pertes des dents statorique :**

Les dents sont soumises à une magnétisation pulsatrice, on à ici à tenir compte seulement de l'augmentation des pertes dues à l'imperfection de la technologie et des pertes liées aux harmoniques supérieure de l'induction.

Les pertes dans les dents statorique sont calculées par la formule suivante :

$$P_{jz1} = K_{dz} * B_{zmax}^2 * G_{z1} * P_{10} * (f/50)^B. \quad (IV-8)$$

$$K_{dz}=1.8, B_{zmax}=0.2, l_j= 90, Z_1=36, K_{fer}=0.97, \gamma_c = 7.8 * 10^3 \text{ Kg/m}^3,$$

$G_{Z1}$  : est le poids des dents statorique.

$$G_{z1} = h_{z1} * B_{z1} * l_j * Z_1 * K_{fer} * \gamma_c * 10^{-9} \quad (IV-9)$$

$$G_{Z1} = 16 * 5.5 * 90 * 36 * 0.97 * 7.8 * 10^3 * 10^{-9} = 2.15 \text{ Kg}$$

$$P_{jz1} = 1.8 * 0.2^2 * 2.15 * 2.5 * 1^{1.5} = 0.38 W.$$

Puisque les pertes fer est la somme de ses deux pertes alors  $P_f = 1.62 W$ .

### IV-8 : calcul des pertes par expérience :

$$\text{On } R = 9.75 \Omega \text{ mesurer par ohmmètre à } 30^\circ \text{ alors } R_{100^\circ} = 9.75 * \frac{273+100}{273+30} = 12 \Omega,$$

$I = 3 A$  relevé de l'ampèremètre

$$\text{alors : } P_j = R I^2 = 12 * 9 = 108 W$$

$$P_f = P_{TOT} - P_j = 110 - 108 = 2 W$$

### IV-9 : Calcul analytique des pertes du stator avec rotor :

#### IV-9.1 : Calcul de l'induction dans l'entrefer $B_\sigma$ :

$$B_\sigma = \frac{0.225 * 2P * U * 10^6}{L * D * W_1} = \frac{0.225 * 4 * 82 * 10^6}{9 * 11.5 * 384} = 1856.88 \text{G} = 0.18 \text{T}$$

#### IV-9.2 Calcul des pertes des dents et de la culasse statorique :

##### Calcul de l'induction de la culasse :

$$B_{cl} = 0.5 \frac{\alpha_i \cdot \tau_p \cdot B_\sigma}{K_{fer} \cdot h_{cl}}$$

$$h_{cl} = 12 \text{mm}, \alpha_i = \frac{2}{\pi} = 0.64, \tau_p = \frac{\pi * D_1}{2 * P} = 90.27 \text{mm}, D_1 = 115 \text{mm}, B_\sigma = 0.18.$$

$$B_{cl} = 0.5 \frac{0.64 * 90.27 * 0.18}{0.97 * 12} = 0.44 \text{ T}.$$

##### ➤ Calcul des pertes des dents statorique

Les pertes dans la culasse sont données par:

$$P_{cl} = P_{10} \left( \frac{f_1}{50} \right)^\beta (K_{dc} * B_{clmax}^2 * G_{cl})$$

$$G_{cl} = \pi [D_{ex} - h_{cl}] * K_{fer} * l_i * h_{cl} * \gamma_c * 10^{-9}.$$

$$\text{Ou : } \gamma_c = 7.8 * 10^3 \text{ Kg/m}^3$$

$$D_{ex} = 170 \text{mm},$$

$$h_{cl} = 12 \text{mm}$$

$$K_{fer} = 0.97, l_i = 90 \text{mm}.$$

$$G_{cl} = 3.14 * (170 - 12) * 0.97 * 90 * 12 * 7.8 * 10^3 * 10^{-9} = 4.05 \text{Kg}.$$

$$P_{cl} = 2.5 * 1.2^3 * 1.7 * 0.44^2 * 4.05 = 3.33 \text{ W}$$

##### • Induction des dents statoriques :

$$B_{z1max} = \frac{t_1 * B_\sigma}{K_{fer} * B_{z1}}$$

$$t_1 = \frac{\pi D}{z_1} = \frac{3.14 * 115}{36} = 10.53.$$

$$B_{z1max} = \frac{10 * 0.18}{0.97 * 5.5} = 0.33 \text{ T}$$

### ➤ Calcul des pertes des dents statorique :

Les pertes dans les dents statorique sont calculées par la formule suivante :

$$P_{jz1} = K_{dz} * B_{zmax}^2 * G_{z1} * P_{10} * (f1/50)^B$$

$$K_{dz}=1.8, B_{zmax}=0.33, l_j=90$$

$$Z_1=36, K_{fer}=0.97, \gamma_c = 7.8 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3,$$

$G_{z1}$  : est le poids des dents statorique.

$$G_{z1} = h_{z1} * b_{z1} * l_j * Z_1 * K_{fer} * \gamma_c * 10^{-9}$$

$$= 16 * 5.5 * 90 * 36 * 0.97 * 7.8 * 10^3 * 10^{-9} = 2.15 \text{ Kg}$$

$$P_{jz1} = 1.8 * 0.33^2 * 2.15 * 2.5 * 1^1 = 0.9 \text{ w.}$$

$$\text{Donc } P_f = 4.32 \text{ W}$$

### IV-10 : calcul de pertes par expérience :

$$\text{On a } R = 9.75 \Omega \text{ à } 30^\circ \text{ alors à } 120^\circ R_{120^\circ} = 9.75 * \frac{120+273}{30+273} = 12.64 \Omega$$

$$I = 3 \text{ A.}$$

$$\text{Donc } P_j = 12.64 * 9 = 113.76 \text{ W. } P_r = 38 \text{ W}$$

$$P_f = P_{TOT} - P_j = 160 - 116.73 - 38 = 5.27 \text{ W.}$$

Dans notre cas il existe des pertes rotorique que ne peut pas n' négliger car on a un rotor bloquer (le cas de transformateur statique).

Ces pertes rotorique sont calculées dans l'annexe.

La différence qui existe entre les 2 méthodes on peut l'explique par :

- Les paramètres et les technologies utilisées.
- La différence entre la norme standard et le stator utilisé.
- Les erreurs humaines (erreurs de lecteur par exemple).

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre on a présenté les essais expérimentaux, les résultats obtenus et les valeurs de la modélisation.

Ces résultats nous permettent de connaître le fonctionnement des capteurs et leurs utilisations et celle de la caméra thermique pour obtenir la répartition de la température dans le stator.

On a arrivé au résultat que la cause principale et la plus influente dans l'échauffement des enroulements sont : les pertes joule.

# **Conclusion Générale**

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale :

Vu l'importance de l'étude du comportement thermique dans les machines électriques elle représente actuellement un facteur décisif pour l'utilisateur et le constructeur.

Pour cela notre travail a été consacré aux relevés expérimentaux et modélisation pour déterminer l'échauffement des enroulements statorique.

Alors on utilise la méthode des thermocouples pour une meilleure précision, et un stator crue pour l'impossibilité de les placer les capteurs dans l'encoche du stator de la machine.

Les résultats que nous avons obtenu montrent l'échauffement qui est causé principalement par les pertes joules qui est dues au passage du courant dans les bobines statoriques, et que le milieu de la bobine est la partie qui représente l'élévation la plus importante des températures statoriques.

On a remarqué aussi que l'absence de la carcasse présente un effet négatif sur le refroidissement de la machine, ce qui est retarde la stabilisation.

On a choisi de placer les capteurs dans des places juger théoriquement les plus chauds, pour que l'étude soit plus judicieux et plus complète.

Il peut qu'il existe une légère différence entre la modélisation et l'étude théorique pour des considérations technologique, les erreurs humaine, l'influence de l'environnement et le changement des constantes entre le stator crue et la machine asynchrone.

Enfin, il est noté que les résultats obtenus dans notre travail peuvent constituer une plateforme sur laquelle un modèle thermique plus précis de la machine asynchrone peut être élaboré.

# **Annexes**

# Annexe 1

## Annexe

---

I-Calculer des densités des pertes introduit dans le FEMM pour les différentes parties du stator étudié :

### Calcul des densités des pertes dans le cuivre au niveau des encoches :

$$P_j = R_{\text{fil}} * I^2$$

l : longueur du conducteur.

s : section de fil.

$$D_{\text{fil}} = 0.71 \text{ mm} \text{ donc } S_{\text{fil}} = 0.396 \text{ mm}^2.$$

### Calcul des densités des pertes dans l'encoche du stator creux :

$$D_{\text{enc}} = \frac{P_{j\text{stenc}}}{V_{\text{enc}}} = \frac{R_{\text{enc}} * I^2}{V_{\text{enc}}} = \frac{3.32 * 9}{0.000006138} = 4870000 \text{ W/m}^3.$$

### Calcul de volume des encoches statoriques :

#### Calcul du volume de cylindre creux :

$$V_{\text{cyl cre}} = l \Pi (D_{\text{ext}}^2 - D_{\text{int}}^2) / 4.$$

$$= 90 * 3.14 * (170^2 - 115^2) / 4$$

$$V_{\text{cyl cre}} = 1107438.75 \text{ mm}^3$$

#### Calcul de volume total :

On le calcul par la somme des trois volumes de trois formes différentes d'où :

$$V_1 = \pi \left( \frac{D^2}{4} l \right) \frac{1}{2} = 1340.428 \text{ mm}^3 \text{ (demi-cercle).}$$

$$V_2 = \frac{a+b}{2} hl = 4769.01 \text{ mm}^3 \text{ (trapèze).}$$

$$V_3 = a * c * l = 28.80 \text{ mm}^3 \text{ (rectangle).}$$

$$V_{\text{enc st}} = V_1 + V_2 + V_3 = 6138.23908 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{enc tot}} = 220976.28 \text{ mm}^3.$$

$$c = 0.66 \text{ mm.}$$

$$a = 2.8 \text{ mm.}$$

$$b = 4 \text{ mm.}$$

$$h = 15.585 \text{ mm.}$$

## Annexe

---

Volume des tôles statorique  $V_{Ts}=V$  de cylindre creux du stator- $V$  total des encoches statorique

$$V_{Ts}=1107438.75-220976.28 = 886462.47\text{mm}^3.$$

**Calcul des densités des pertes dans le fer du stator creux :**

$$D_{Ts} = \frac{P_{fer}}{V_{Ts}} = \frac{2}{0.000131710} = 15184.87\text{W/m}^3.$$

**Calcul des densités des pertes dans l'encoche du stator avec un rotor :**

$$R_{T_2} = R_{T_1} \frac{T_2+273}{T_1+273} = 3.32 * \frac{120+273}{100+273} = 3.49\Omega$$

$$D_{enc} = \frac{P_{jstenc}}{V_{enc}} = \frac{R_{enc} * I^2}{V_{enc}} = \frac{3.49 * 3^2}{0.0000006138} = 5117302.05 \text{ W/m}^3.$$

**Calcul des densités des pertes dans le fer du stator creux :**

$$D_{Ts} = \frac{P_{fer}}{V_{Ts}} = \frac{4.32}{0.000131710} = 32799.33\text{W/m}^3.$$

**Calcul des pertes rotorique et des densités des pertes :**

**Calcul de la résistance de la barre :**

$$R_b = \rho \frac{l}{S} 10^3 = 48.8 * 10^{-9} \frac{160}{45} 10^3 = 1.73 * 10^{-4} \Omega.$$

$R_b$  : représente la résistance de la barre.

**Calcul du courant rotorique :**

$$I_2 = \frac{K_i * 2 * m_1 * I_1 * W_1 * K_{enr}}{Z_2} = \frac{0.9 * 2 * 1 * 3 * 384 * 0.96}{28} = 71.08\text{A}.$$

**Calcul des pertes joules dans la barre rotorique :**

$$p_{jb} = m_2 * R_{bar} * I_2^2 = 28 * 1.73 * 10^{-4} * 71.08^2 = 24.47\text{W}.$$

**Calcul du volume des barres rotorique :**

$$V_{bar} = m_2 * S_{bar} * l = 28 * 45 * 160 = 201600\text{mm}^3.$$

**Calcul de la densité des pertes dans la barre rotorique :**

$$\Delta_b = \frac{P_{jb}}{V_{bar}} = \frac{24.47}{0.0002016} = 121378.96\text{W/m}^3.$$

## Annexe

---

### Calcul de section de l'anneau :

$$S_{an} = e * L_r = 13 * 24 = 312 \text{ mm}^2.$$

e : épaisseur de l'anneau.

$L_r$  : largeur de l'anneau.

### Calcul de la résistance de l'anneau :

$$R_{an} = \frac{\rho_{al} * 2\pi * D_{an} * 10^3}{Z_2 * S_{an}} = \frac{48 * 10^{-9} * 6.28 * 84 * 10^3}{28 * 312} = 2.8 * 10^{-6} \Omega.$$

$$D_{an} = D_{ex} - h_{an} = 108 - 24 = 84 \text{ mm}.$$

$R_{an}$  : résistance d'un anneau.

$\rho_{al}$  : Résistivité de l'aluminium à 115°C.

$D_{an}$  : diamètre moyen de l'anneau.

$Z_2$  : épaisseur de l'anneau.

$S_{an}$  : section de l'anneau.

### Calcul de la résistance de l'anneau ramenée à la barre :

$$R'_{an} = \frac{R_{an}}{\Delta^2}.$$

$$\Delta = 2 \sin\left(\frac{\pi * P}{Z_2}\right) = 2 \sin\left(\frac{3.14 * 2}{28}\right) = 0.222.$$

$$R'_{an} = \frac{2.8 * 10^{-6}}{0.222^2} = 5.68 * 10^{-5} \Omega.$$

$$P_{jran} = m_2 * R_{an} * I_2^2 = 28 * 5.68 * 10^{-5} * 71.08^2 = 0.46 \text{ W}.$$

### Calcul du volume d'un anneau de court-circuit :

$$V_{an} = S_{an} * l = 312 * 160 = 49920 \text{ mm}^3.$$

### Calcul de la résistance rotorique $R_2$ :

$$R_2 = R'_{an} + R_b = 5.68 * 10^{-5} + 1.73 * 10^{-4} = 2.29 * 10^{-4}.$$

### Calcul des pertes joules rotorique total :

$$P_{jr} = m_2 * R_2 * I_2^2 = 28 * 2.29 * 10^{-4} * 71.08^2 = 32.39 \text{ W}.$$

## Annexe

### Calcul du volume de fer :

$$V_{\text{fer}} = \left[ \frac{\pi(d_2^2 - d_1^2)}{4} - S_b * Z_2 \right] * l = \left[ \frac{3.14 * (110^2 - 47^2)}{4} - 45 * 28 \right] * 160 = 1040709.6 \text{ mm}^3.$$

### Calcul des pertes fer dans le fer :

$$P_{\text{fer}} = P_{\text{tot}} - P_{\text{jst}} - P_{\text{fst}} - P_{\text{jr}} = 160 - 116.73 - 4.32 - 32.39 = 6.56 \text{ W}$$

### Calcul de densité des pertes dans le fer :

$$\Delta_f = \frac{P_f}{V_f} = \frac{6.56}{0.001040709} = 6303.39 \text{ W/m}^3$$

### Les dimensions géométriques de stator :

Composante	Valeur	Unité
Diamètre extérieur	170	mm
Diamètre intérieur	150	mm
Longueur axial	90	mm
Nombre d'encoche	36	-
Section de l'encoche	96.4	mm <sup>2</sup>
Diamètre du conducteur nu	0.71	mm
Diamètre du conducteur isole	0.753	mm
Epaisseur de l'entrefer	4	mm

Tableau 1 : dimension du stator.

Conductivité	K <sub>x</sub>	K <sub>y</sub>
Cuivre	0.8	0.8
Air	0.025	0.025
Acier	75	75
Fer	70	70
Iso	0.3	0.3
Aluminium	204	204

Tableau 2 : valeur des conductivités selon l'axe X et Y.

# Annexe 2

# **Bibliographie**

## **Bibliographie :**

- [1]**WIDED D** : (conception et dimensionnement des machines asynchrones de petite et moyen puissance) thèse doctorat en science technique, école polytechnique fédérale de Lausanne, 2001.
- [2]**THEODORE WILDI** :(électrotechnique), Edition Boeck université, 8em édition.
- [3]**M.BELMKDAD, S.BERRAH** :(étude expérimentale thermique d'un moteur asynchrone auto-ventilé), mémoire, master électrotechnique, UMMTO, 2013.
- [4] **THEODORE WILDI**:(électrotechnique) Edition de Boeck université, 4em édition.2000.
- [5] **H.HALICHE, D.ANSEUR, A.BACHIR** : (calcul d'un moteur asynchrone a cage d'écureuil) mémoire DEUA, université de tizi -ouzou, promotion 2006.
- [6] **K.SELAM, S.SEDKAOUI** :( Contribution à l'étude expérimentale de l'échauffement d'un moteur asynchrone a cage de puissance 4kw sous différents régimes de fonctionnement).
- [7] **S.SIAGHI** :(mesure de la température dans une encoche statorique d'une machine asynchrone à cage).
- [8]**M.Liwshitz, L.Maret** : (calcul des machines électrique), tom I et II, édition SPES, Lausanne (suisse) ,1967.
- [9]**J.OUIN**, (transfert thermique), Edition castilla, 1998.