

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



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

## Mémoire de Fin d'Etude de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

**Spécialité : MACHINES ELECTRIQUES**

*Présenté par*

**Abderazak NESSAH**

**Hayat OUMEZZAOUCHE**

Thème

# Mesure et modélisation thermique d'un stator d'une machine asynchrone

*Mémoire soutenu publiquement le 24 septembre 2017 devant le jury composé de :*

**M<sup>r</sup>. DENOUN Hakim**  
MCCA, UMMTO, Président

**M<sup>r</sup>. BOUTORA Youcef**  
MCCA, UMMTO, Examineur

**M<sup>r</sup>. KHALDI Rabah**  
MACA, UMMTO, Encadreur

**M<sup>r</sup>. KIMOUCHE Abdelghani**  
MACA, UMMTO, Examineur

## *Remerciement*

*Avant tout nous remercions le bon dieu de nous avoir donné la force et le courage pour réaliser ce travail.*

*Nous remercions notre promoteur Monsieur **KHALDI .R** pour sa grande disponibilité, lors de nos différentes sollicitations et ses précieux conseils pour l'élaboration de ce projet.*

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

*Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes très chers parents pour leurs aides et leurs soutiens tout  
au long de mes études*

*A mon frère et mes sœurs*

*A toute ma famille*

*Et enfin*

*A ma binôme Hayat avec qui j'ai partagé ce travail*

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

*Abderazak*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes très chers parents pour leurs aides et leurs soutiens tout  
au long de mes études*

*A mon frère et mes sœurs*

*A toute ma famille*

*Et enfin*

*A mon binôme Abdarezak, avec qui j'ai partagé ce travail*

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

*Hayat*

# Sommaire

Introduction générale .....	01
<b>Chapitre I Généralités et pertes dans une machine asynchrone</b>	
I.1. Introduction .....	02
I.2. Généralités sur la machine asynchrone .....	02
I.2.1. Constitution et principe de fonctionnement.....	02
I.2.2. Principe de fonctionnement .....	04
I.3. Bilan de puissance de la machine.....	06
I.3.1. Puissance absorbée.....	06
I.3.2. Puissance électromagnétique .....	06
I.3.3. Puissance mécanique .....	07
I.3.4. Puissance utile .....	07
I.4. Pertes existantes dans une machine asynchrone .....	07
I.4.1. Pertes dans le circuit électriques .....	07
I.4.2. Pertes dans le circuit magnétique .....	08
I.4.3. Pertes supplémentaires .....	11
I.4.4. Représentation des différentes pertes dans une machine asynchrone.....	12
I.5. Conclusion .....	12
<b>Chapitre II Mode de transfert de chaleur et méthodes d'étude thermique</b>	
II.1. Introduction .....	14
II.2. Transfert de chaleur par conduction .....	14
II.2.1. Conductivité thermique .....	15
II.2.2. Conductivité thermique des solides hétérogènes .....	15
II.3. Transfert de chaleur par convection .....	18
II.3.1. Convection naturelle .....	18
II.3.2. Convection forcée .....	18
II.4. Transfert de chaleur par rayonnement .....	19
II.5. Echange thermique dans une machine électrique .....	19
II.6. Méthode d'étude thermique .....	20
II.6.1. Méthodes expérimentales .....	21
II.6.2. Méthodes théoriques .....	22
II.7. Conclusion .....	25

## Chapitre III Moyens de mesure de température

III.1. Introduction .....	26
III.2. Méthode de mesure de la température par contact direct .....	26
III.2.1. Les thermocouples .....	26
III.2.2. Différents types de thermocouple .....	28
III.2.3. Les thermistances .....	29
III.3. méthode de mesure de température sans contact .....	31
III.3.1. Pyrométrie optique .....	31
III.3.2. Principe physique .....	31
III.3.3. Applications du pyromètre infrarouge .....	32
III.3.4. Caméra thermique .....	32
III.3.5. Avantages et inconvénients de la caméra thermique .....	32
III.4. Conclusion .....	33

## Chapitre IV Mesures expérimentales et modélisation thermique de la température du stator creux

IV.1. Introduction .....	34
IV.2. Mesure expérimentale et modélisation de la température en différent points du stator creux .....	34
IV.2.1. Présentation de la machine.....	34
IV.2.1.1. Présentation de stator creux d'étudies .....	34
IV.2.2. Description du banc de l'essai .....	36
IV.2.3. Mesures préliminaires.....	36
IV.2.3.1. Définition de l'étalonnage.....	36
IV.2.3.2. Etalonnage des instruments de mesures.....	36
IV.3. Présentation et principe de l'essai .....	37
IV.3.1. Observations .....	38
IV.3.2. Emplacements des thermocouples dans le stator creux .....	38
IV.3.3. Essai préliminaire .....	39
IV.4. Déférents essais expérimentaux effectués sur le stator étudié .....	40
IV.4.1. Essai du stator avec une phase bobiné est alimentée en monophasé.....	40
IV.4.1.1. présentation de la structure étudiée.....	44
IV.4.1.2. Modélisation thermique par élément finis du stator creux sous le logiciel FEMM .....	44
IV.4.2. Essai du stator avec un bobinage biphasé (une seule phase alimentée en monophasé) .....	48
IV.4.3. Essai du stator biphasé (deux phases alimentées en triphasé) .....	51

IV.4.3.1. Essai préliminaire.....	51
IV.5. Mesure des pertes fer et Joules .....	56
IV.6. Conclusion .....	57
Conclusion générale .....	58
Bibliographie.....	59
Annexe.....	60

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Les machines asynchrones possédant un rotor « à cage » sont connues sous le nom des machines à cage d'écureuil. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de rotation du rotor n'est pas exactement la même que le champ tournant produit par les courants statoriques. Bien que les machines asynchrones soient de construction très robuste, elles fonctionnent aussi de plus en plus près de leurs limites thermiques.

L'échauffement des machines tournantes est une conséquence du fonctionnement car la transformation de l'énergie s'accompagne souvent de pertes des diverses types (Joule, fer (hystérésis, courants de Foucault), mécaniques). L'élévation de la température peut accélérer le vieillissement de certaines parties de la machine. Au-delà d'une température critique une augmentation de la température de 6 à 10 °C peut réduire de moitié la durée de vie d'une machine électrique [13] et une température élevée maintenue prolongée peut endommager le système d'isolation des enroulements. Pour ces raisons l'étude du comportement thermique et la connaissance de la température en tous points de la machine, devient indispensable.

Les méthodes théoriques telles que la modélisation thermique, nodale ou élément finis, sont basés sur des tests expérimentaux pour la détermination et l'analyse de l'échauffement de la machine asynchrone.

Du fait de la très forte hétérogénéité thermique de la machine, l'utilisation d'un modèle thermique théorique basé sur des hypothèses simplificatrices, limitent la précision des résultats. Pour cette raison, une étude expérimentale du comportement thermique de la machine reste indispensable. Le présent travail est consacré à l'étude expérimentale de l'échauffement d'un stator creux, particulièrement dans l'encoche, d'une machine asynchrone à cage. A cet effet un dispositif expérimental est utilisé pour mesurer la température au niveau du stator creux. Dont ce dernier est équipé de deux capteurs dans l'encoche et un autre sur une tête de bobine, et aussi pour les mesures surfaciques on a opté pour la caméra thermique. Et donne ainsi d'avantage l'information sur la distribution de la température dans le stator. les résultats obtenus nous permettrons de validés un modèle thermiques par éléments finis sous le logiciel FEMM.

Pour cela nous avant subdivisé notre travail en quatre chapitres selon les points suivants :

- Pertes dans une machine asynchrone.
- Mode de transfert de chaleur et méthodes d'étude thermique.
- Moyens de mesure de température dans une machine électrique.
- Etude expérimentale, comparaison et validation.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale.





# **Chapitre I**

## **Généralités et pertes dans la machine asynchrone**

### **I.1. Introduction**

Lors du fonctionnement d'une machine asynchrone à cage, un processus de transformation d'énergie s'effectue, soit d'une énergie électrique en énergie mécanique, ou vice-versa. Pendant ce processus une partie de cette énergie se dissipe sous forme de perte de puissance dans les différentes composantes de la machine, celle-ci se manifeste sous forme de chaleur. Ces pertes peuvent être réparties comme suit :

- ✓ Les pertes dans le circuit électrique
- ✓ Les pertes dans le circuit magnétique
- ✓ Les pertes dans les parties mécaniques
- ✓ Les pertes supplémentaires

Dans ce chapitre nous commençons par des généralités sur la machine asynchrone puis nous terminons par donner les différentes définitions des pertes qui y sont engendrées par son fonctionnement.

### **I.2. Généralités sur la machine asynchrone**

#### **I.2.1. Constitution et principe de fonctionnement :**

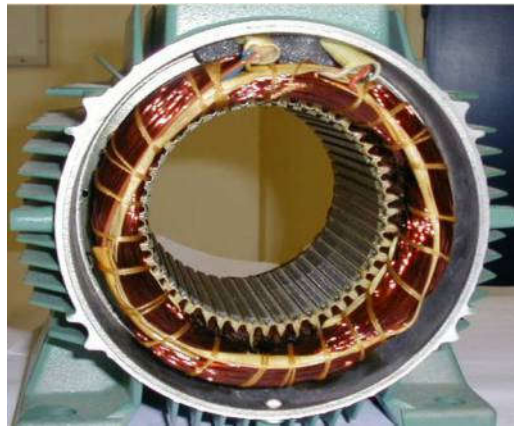
La machine asynchrone (MAS) et comme toute les autres machines électriques tournantes, elle est une machine réversible, elle peut fonctionner en génératrice ou bien en moteur. Et suite à sa robustesse, sa simplicité, son prix peu élevé et sa facilité d'entretien, elle est beaucoup plus utilisée en moteur, elle tourne à une vitesse inférieure à celle de synchronisme d'où son nom machine asynchrone.

##### **I.2.1.1. Constitution :**

La MAS est constituée principalement de deux armatures coaxiales, l'une est fixe qu'on appelle inducteur (le stator) Fig I.1 où est connectée l'alimentation électrique, et l'autre est mobile qu'on appelle induit (le rotor) qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.

##### **I.2.1.2. Le stator :**

Le stator représente l'inducteur de la machine, il comporte une carcasse généralement faite en acier renfermant un empilage de tôles identiques qui constituent un cylindre creux. Ces tôles sont percées de trous à leurs périphéries intérieures. L'alignement de ces trous forme des encoches dans lesquelles sont placés les bobinages du stator [2].



**Figure I.1.** Stator d'une machine asynchrone [10]

### I.2.1.3. Le rotor :

Le rotor (Fig I.2) représente l'induit de la machine, il est séparé du stator par un entrefer très court (de 0.4 à 2mm). Selon sa constitution, on distingue deux types de rotor :

- Rotor bobiné
- Rotor à cage d'écureuil

#### a) Rotor bobiné ou à bague :

Le rotor comporte un bobinage, généralement triphasé, composé de trois enroulements montés en étoile, logés dans les encoches d'un circuit magnétique constitué de disques empilés sur l'arbre de la machine. Les encoches du circuit magnétique sont légèrement inclinées par rapport à l'axe de la machine de façon à réduire certaines pertes dues aux harmoniques [1].

L'extrémité de chaque enroulement est reliée à une bague tournant avec l'arbre. Ces bagues permettent, par l'intermédiaire de trois balais, d'insérer une résistance en série avec chacun des trois enroulements lors du démarrage en moteur. En fonctionnement normal, les trois balais sont court circuits [2].

#### b) Rotor à cage d'écureuil :

Le rotor à cage est constitué d'un circuit magnétique analogue à celui du rotor bobiné, mais contrairement aux conducteurs du rotor à bague, ceux du rotor à cage représentent des barres faites en cuivre, en bronze ou en aluminium, court-circuitées à leurs extrémités à l'aide de deux couronnes, ce qui lui donne la forme d'une cage d'écureuil. Ce type de moteur est le plus employé, car il est facile à construire, moins coûteux et plus robuste que les moteurs à rotor bobiné.

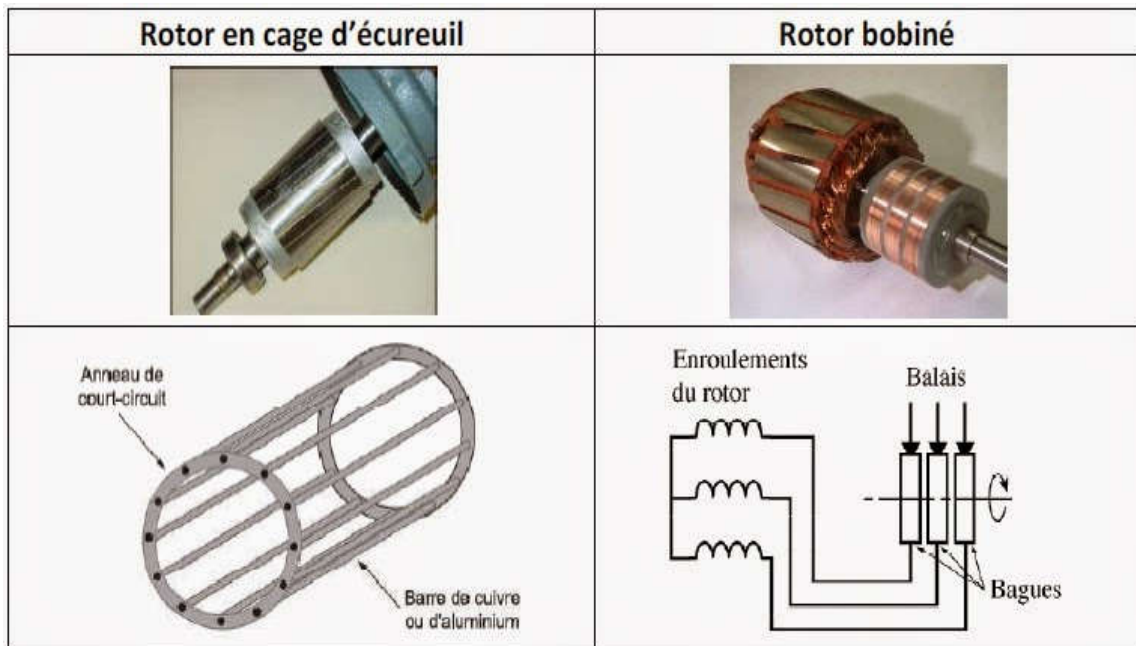


Figure I.2. Rotor bobiné et à cage d'écureuil d'une machine asynchrone [10]

### I.2.2. Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage Fig. I.3, et basé sur Les trois principes de l'électrotechnique :

1-création d'un champ magnétique par un courant qui définit par la loi d'ampère.

2-force maximale exercée sur un conducteur placé dans un champ magnétique et qui est définit par la loi de LORENZ.

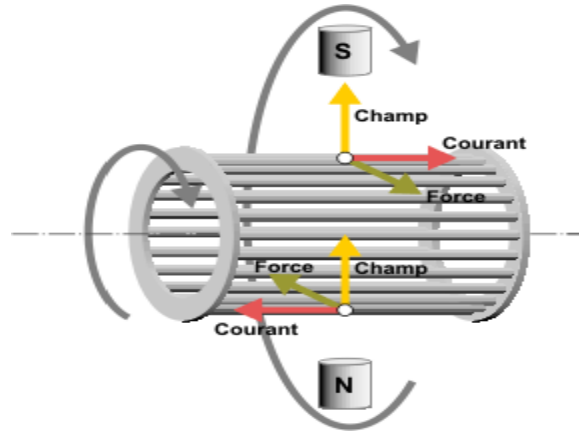
3-déplacement d'un conducteur dans un champ magnétique et tension induite et qui est définit par la loi de l'induction électromagnétique de Faraday.

Le principe des moteurs à courant alternatifs réside dans l'utilisation d'un champ magnétique tournant produit par des tensions alternatives. La circulation d'un courant dans une bobine crée un champ magnétique. Ce champ est dans l'axe de la bobine, sa direction et sont intensité sont en fonction du courant  $I$ .

Dans le cas du moteur triphasé, les trois bobines sont disposées dans le stator à  $120^\circ$  électrique les unes des autres.

L'alimentation du stator par un système de courant triphasé donne naissance à un champ tournant à la vitesse de synchronisme au niveau de l'entrefer, ce qui crée une f.é.m. induite dans les enroulements du rotor qui sont court-circuités et par conséquent des courants induits appelés courants de Foucault.

D'après la loi de Lenz, l'action électromagnétique que subit alors le rotor tend à s'opposer à la cause productrice de ces courants [3]. Le rotor tourne alors dans le même sens que le champ, à une vitesse de rotation inférieure à celle du synchronisme, d'où le nom de machine asynchrone.



**Figure I.3.** Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone à cage [10]

Cette différence de vitesse de rotation du rotor par rapport à celle du champ tournant, nous ramène à définir un paramètre qui caractérise les machines asynchrones, qu'on appelle le glissement, ce dernier est le rapport de la vitesse du glissement ( $\Omega_s - \Omega$ ) du rotor par rapport au champ tournant du stator à la vitesse de synchronisme  $\Omega_s$ .

Le glissement s'exprime en % de la vitesse de synchronisme :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \cdot 100 \quad (\text{I-1})$$

Avec :

$g$  : glissement

$\Omega_s$  : La vitesse angulaire de synchronisme [rad/s]

$\Omega$  : La vitesse angulaire de la rotation du rotor [rad/s]

### I.3. Bilan de puissance d'une machine asynchrone :

Le bilan de puissance est représenté par le schéma suivant :

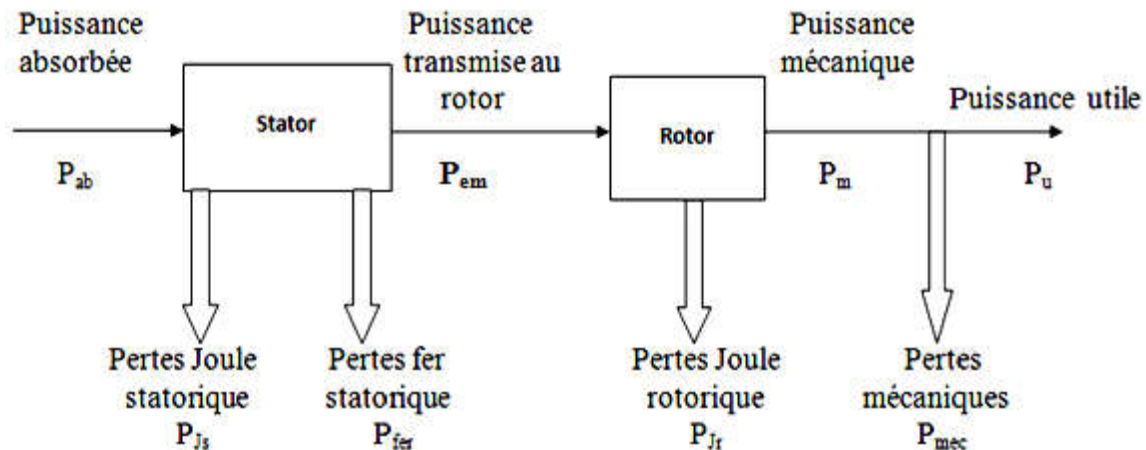


Figure I.4. Bilan de puissance

#### I.3.1. Puissance absorbée :

La puissance absorbée par un moteur asynchrone est une puissance active électrique lorsque le moteur est connecté à un réseau triphasé

$$P_{ab} = \sqrt{3} U I \cos \varphi \quad [\text{W}] \quad (\text{I-2})$$

Avec:

$P_{ab}$ : la puissance absorbée par le stator [W].

$U$  : la tension d'alimentation [V].

$\cos \varphi$  : Facteur de puissance.

#### I.3.2. Puissance électromagnétique :

C'est la puissance transmise au rotor par le champ tournant à travers l'entrefer, est donnée comme suit :

$$P_{em} = P_{ab} - (P_{js} + P_{fer}) \quad [\text{W}] \quad (\text{I-3})$$

### I.3.3. Puissance mécanique :

La puissance mécanique développée par le rotor est égale à la puissance électromagnétique que le stator lui fournit, les pertes fer au rotor sont négligeables [14].

$$P_m = P_{em} \quad [W] \quad (I-5)$$

Avec:

$P_m$ : La puissance mécanique [w]

### I.3.4. Puissance utile :

De la puissance mécanique on soustrait les pertes mécaniques  $P_{mec}$ , pour obtenir la puissance utile :

$$P_u = P_m - P_{mec} \quad [W] \quad (I-6)$$

## I.4. Pertes existantes dans une machine asynchrone :

### ✓ Les pertes dans le circuit électrique

Ces pertes sont prises en considération dans toutes les parties de la machine qui sont traversées 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

Elles se présentent les pertes par frottement et ventilation.

Dans le cas dans notre étude seules les pertes fer et électrique sont considérés.

### I.4.1. Pertes dans le circuit électriques :

Ce sont des pertes électriques dissipées par effet joule dans les enroulements statorique et rotorique.

### ✓ Au stator:

Les pertes joules statoriques en triphasé sont écrites par la formule suivante :

$$P_{js} = m_1 * R_1 I_1^2 \quad [W] \quad (I-7)$$

Avec :

$m_1$  : Nombre de phase statorique.

$P_{js}$  : Les pertes par effet joule au stator [W].

$R_1$  : La résistance d'une phase statorique (calculée dans l'annexe A) [ $\Omega$ ].

$I$  : courant d'une phase statorique

✓ **Au rotor :**

$$P_{jr} = m_2 * R_2 I_2^2 \quad [W] \quad (I-8)$$

Avec :

$m_2$  : Nombre de phase rotorique.

$P_{jr}$  : Les pertes par effet joule au rotor [W].

$R_2$  : La résistance d'une phase rotorique. (Calculée dans l'annexe A) [ $\Omega$ ].

$I_2$  : courant d'une phase au rotor.

Pour calculer les pertes fers dans d'une machine électrique on a utilisé la méthode de dimensionnement.

➤ **Méthode de dimensionnement :**

La méthode de dimensionnement est une méthode théorique basée sur le cahier de charge et les dimensions géométriques et électrique de la machine

### I.4.2. Pertes dans le circuit magnétique :

Du fait que les matériaux utilisés pour ce circuit sont habituellement à base de fer, elles sont appelées aussi pertes fer.

Ce sont des pertes par hystérésis et par courant de Foucault [1], ces dernières sont en fonction du flux magnétique, elles ne dépendent que de la tension d'alimentation et de la fréquence des courants statorique. Une grande partie de ces pertes se dissipent au niveau des dents et la culasse statorique, elles sont réparties comme suit :

#### I.4.2.1. Les pertes dans la culasse statorique :

Pour évaluer les pertes dans la culasse statorique on multiplie les pertes spécifiques calculées pour une induction  $B_{cmax}^2$  par la masse d'acier de la culasse, et on introduit un coefficient de majoration.

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{fcl} = P_{10(50Hz)} * \left(\frac{f}{50}\right) * K_{dc} * G_{c1} * B_{cmax}^2 \quad [W] \quad (I.9)$$

Avec :

$K_{dc}$ : Coefficient total de majoration des pertes tenant compte de l'imperfection de la technologie.  $K_{dc} = (1,3 \div 1,7)$  On le prend égale à 1,7.

$P_{10(5 \text{ Hz})}$ : Pertes spécifiques dans les tôles d'acier à 1 Tesla  $P_{10(5 \text{ Hz})} = 2.6 \text{ W /Kg}$

$G_{cl}$ : Le poids total de la culasse, il est donné par la formule suivante [kg]:

$$G_{cl} = \pi(D_{1ext} - h_{c1}) * K_{fer} * L_i * h_{c1} * \gamma_{c1} * 10^{-9} \quad [\text{kg}] \quad (\text{I.10})$$

Avec :

$L_i$ : Longueur virtuelle du stator [mm].

$h_{c1}$ : Hauteur de dos le stator [mm]

$\gamma_c$ : La masse volumique, avec  $\gamma_{c1} = 7,8 * 10^3 \text{ kg/m}^3$

$\beta$ : Coefficient de dilatation des tôles,  $\beta=3/2$

### I.4.2.2. Les pertes dans les dents statorique :

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

$$P_{fz1} = K_{dz} * B_{z1max}^2 * G_{z1} * P_{10(50Hz)} * \left(\frac{f}{50}\right)^\beta \quad [\text{W}] \quad (\text{I.11})$$

Avec :

$G_{z1}$ : Poids totale des dents statorique il est donné par l'équation suivante (il est calculé dans l'annexe A):

$$G_{z1} = h_{z1} * b_{z1} * L_i * Z_1 * K_{fer} * \gamma_{c1} * 10^{-9} \quad [\text{kg}] \quad (\text{I.12})$$

Avec :

$h_{z1}$ : Hauteur de la dent [mm].

$L_i$ : Largeur virtuelle du stator [mm].

$b_{z1}$ : Largeur de la dent du stator [mm].

$K_{dz}$ : Coefficient de majoration des pertes.

$K_{dz} = (1,7 \div 1,8)$  dans notre cas on a choisi la valeur de  $K_{dz} = 1,8$ .

$B_{z1max}$ : Induction maximale dans la dent statorique (calculée dans l'annexe A)

Alors, les pertes principales dans le circuit magnétique sont données par la formule suivante :

$$P_f = P_{fcl} + P_{fz1} \quad [\text{W}] \quad (\text{I.13})$$

➤ **Formulation de Steinmetz:**

### I.4.2.3. Les pertes par hystérésis:

Les pertes par hystérésis sont des pertes qui se transforment en chaleur. Et qui résultent des transformations de l'organisation de la matière sous l'effet de la variation en intensité et ou en direction du champ magnétique appliqué.

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{hys} = K_H * f * B_{max}^2 \quad (\text{I.14})$$

$P_{hys}$  : Puissance perdue par hystérésis [W/kg]

$K_H$  : Coefficient des pertes par hystérésis.

$B_{max}$  : Induction maximale à la fréquence  $f$ , [T].

### I.4.2.4. Les pertes fer par courant de Foucault :

Les pertes par courant de Foucault résultant des variations temporelles des flux qui induisent dans la masse du flux des forces électromotrices (f.é.m.). Ces dernières donnent naissance à des courants qui se referment dans la masse du fer.

On peut calculer les pertes par courant de Foucault en utilisant la relation suivante :

$$P_f = K_f(e_1 * f * B_{max}) \quad (\text{I.15})$$

Avec :

$P_f$  : Pertes fer par courant de Foucault [W/kg].

$K_f$  : Coefficient caractéristique de la tôle.

$f$  : La fréquence de la source [Hz].

$e_1$  : Epaisseur de la tôle [m].

### I.4.3. Pertes supplémentaires :

En pratique on trouve des pertes qu'on ne peut pas maîtriser qui sont dues 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 :

Elles sont négligeables dans les machines de faible puissance, on les trouve dans les parties conductrices du stator et du rotor, elles sont dues à la distribution non sinusoïdale de la FMM dans l'entrefer, elles sont déterminées par l'expression suivantes :

$$P = m * r I^2 * K_i K_{di} \quad [\text{W}] \quad (\text{I.18})$$

Avec :

P : pertes de fuites d'encoche.

m : nombre de phase du stator.

I : courant d'une phase du stator.

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

$K_i$  : coefficient de distribution 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 conducteur statorique et les anneaux rotorique.

#### ✓ 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 utilisée, il existe toujours un flux de fuite dans les différentes parties de la machines. L'ensemble de ces fuites est proportionnelle au carré du courant statorique.

### **✓ Pertes à fréquence harmonique :**

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

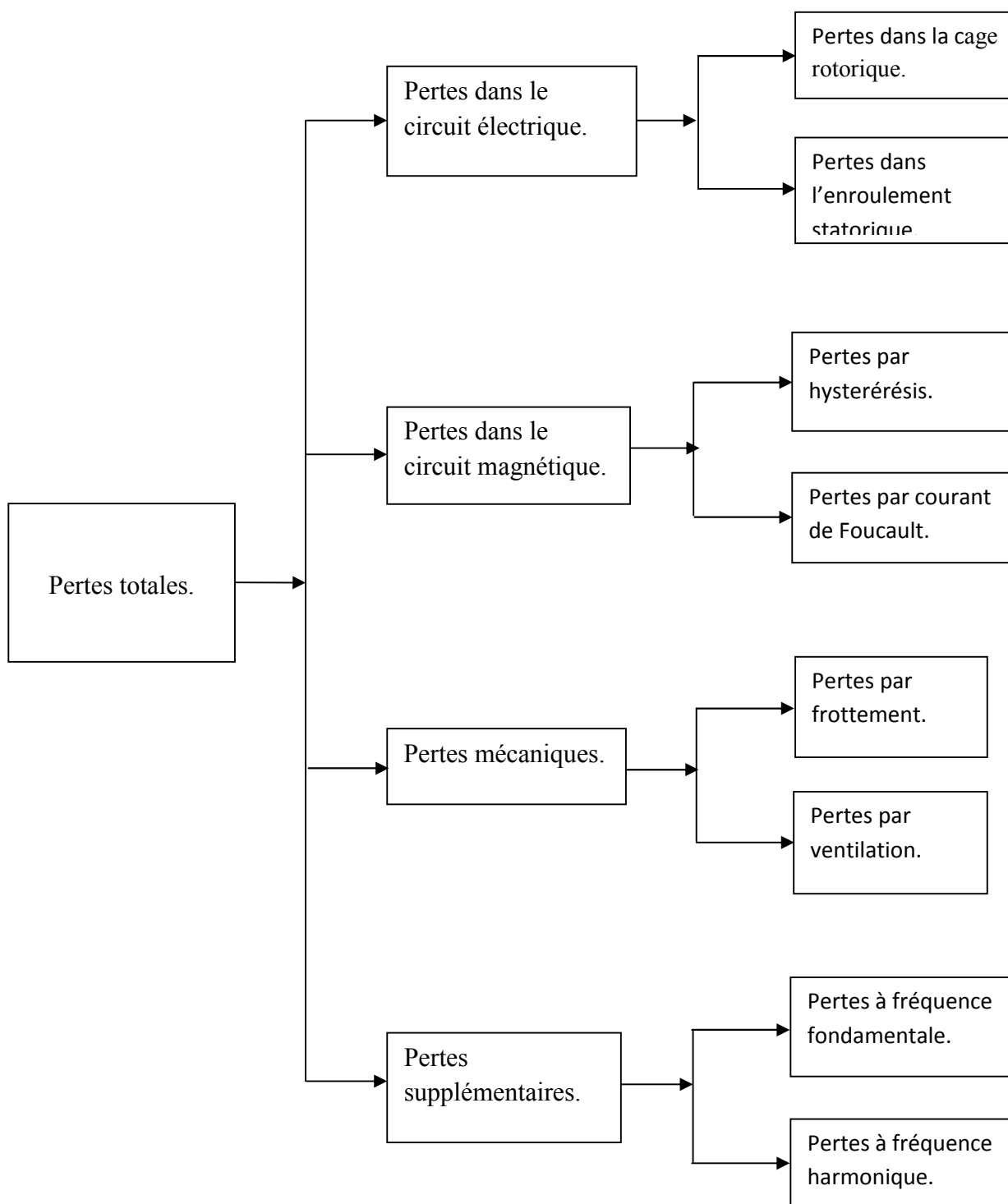
### **I.4.4. Représentation des différentes pertes dans une machine asynchrone :**

Les différentes pertes dans une machine asynchrone sont représentées dans le schéma de la (Figure I.5)

### **I.5. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons établi une description de la machine asynchrone et sa structure (les différents types du rotor, et son principe de fonctionnement).

Après avoir donné les différentes définitions des pertes qui y sont engendrées par leur fonctionnement, en conclure que ces dernières se manifestent sous forme d'une énergie calorifique qui se propage entre les différentes parties actives de la machine puis vers le milieu extérieur. En conclure aussi que ces pertes ne sont pas toutes faciles à déterminer particulièrement les pertes fer et les pertes supplémentaires



**Fig. I .5.** Les différentes pertes dans une machine asynchrone



## **Chapitre II**

# **Modes de transfert de chaleur et méthode d'étude thermique**

### II.1. Introduction :

La conversion de l'énergie électromagnétique dans les machines électrique s'accompagne de pertes (électromagnétiques et mécaniques) qui se transforment en énergie calorifique. Ceci se traduit une élévation de température à l'intérieure de la machine, l'évacuation de cette chaleur s'effectue par trois modes de transfert :

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

Dans ce chapitre, nous commençons par donner une brève description des divers modes de transmission de la chaleur (conduction, convection et rayonnement) ainsi que les lois qui les régissent.

### II.2. Transfert de chaleur par conduction :

La conduction est définie comme étant un échange d'énergie interne provoquée par la différence de température entre deux régions d'un milieu solide, liquide ou gazeux, sans déplacement de la matière.

Ce transfert est caractérisé dans un milieu homogène selon la loi de Fourier qui relie la densité de flux de chaleur au gradient de température

$$\vec{\phi} = -\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad [\text{W/m}^2] \quad (\text{II-1})$$

Ou sous forme algébrique pour le flux de chaleur :

$$\Phi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{II-2})$$

Avec :

$\Phi$ : Flux de chaleur transmis par conduction [W].

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

$\lambda$ : Conductivité thermique [ $\text{W/m } ^{\circ}\text{C}$ ].

$S$  : Air de la section traversée par le flux de chaleur [ $\text{m}^2$ ]

Le signe moins (-) de la relation de Fourier traduit le fait que l'échange de la chaleur se fait du corps chaud vers le corps froid. On peut considérer, avec une précision suffisante,  $\lambda$  comme une constante pour un milieu donné.

### II.2.1. Conductivité thermique :

La conductivité thermique  $\lambda$  est une propriété physico-chimique de la matière que l'on appelle aussi le coefficient de conduction thermique [5].

Dans ce nombreux cas pratique, lorsque les écarts de température ne sont pas trop élevés, on peut considérer, avec une précision suffisante  $\lambda$  comme une constante pour un milieu donné. Alors on peut l'exprimer par trois composans pour saisir sa signification physique, de la relation de Fourier on peut écrire :

$$\lambda = \frac{|\vec{\varphi}|}{\text{grad}T} \quad [\text{W/m.K}^\circ] \quad (\text{II-3})$$

### II.2.2. Conductivité thermique des solides hétérogènes :

Pour déterminer la conductivité thermique des solides hétérogènes, on utilise la notion de la conduction à travers un milieu de conductivité  $\lambda$ , épaisseur ( $e$ ) et de section ( $s$ ) dans la direction de la conduction et dans les faces externes sont respectivement aux températures  $T_1$  et  $T_2$ . Fig.II.1

Pour  $T_1$  et  $T_2$  la chaleur s'écoule de la surface (1) vers la surface (2).

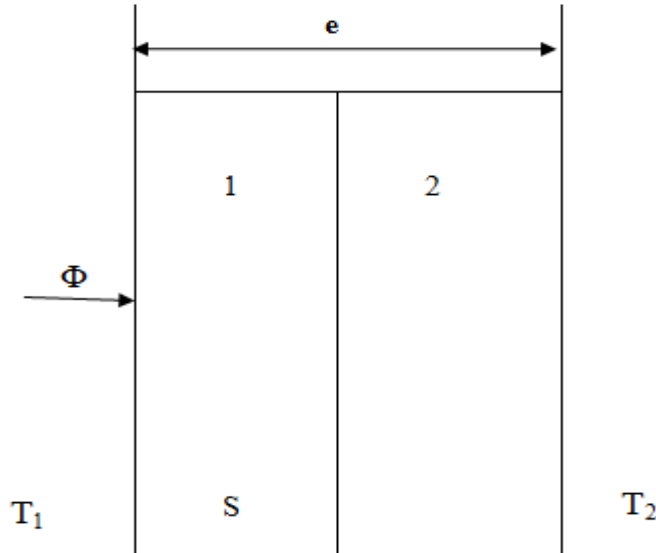


Figure II-1 : transmission de chaleur par conduction

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

$$\Phi = \frac{\lambda s}{e} (T_1 - T_2) \quad (\text{II-4})$$

Avec :

$\Phi$  : flux d'énergie transmise

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

$e$  : distance entre deux surface dont la température est  $T_1$  et  $T_2$

$\lambda$  : conductivité thermique

D'où :

$$T_1 - T_2 = \frac{e \cdot \Phi}{\lambda \cdot S} \quad (\text{II-5})$$

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

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda \cdot S} = \frac{T_1 - T_2}{\Phi} \quad (\text{II-6})$$

**Remarque :** on peut généraliser cette notion au cas de milieu de formes différentes, alors on peut écrire :

$$R_{th} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{e}{S_{moy}} \quad (\text{II-7})$$

➤ Cas d'un cylindre :

$$S_{moy} = \frac{S_2 - S_1}{\log\left(\frac{S_2}{S_1}\right)} \quad (\text{II-8})$$

$S_{moy}$  : est la moyenne logarithmiques des surfaces(1) et (2) interne et externe a cylindre

➤ Cas d'une sphère :

$$S_{moy} = \sqrt{S_1 \cdot S_2} \quad (\text{II-9})$$

$S_{moy}$  : est la moyenne géométrique des surfaces internes et externes.

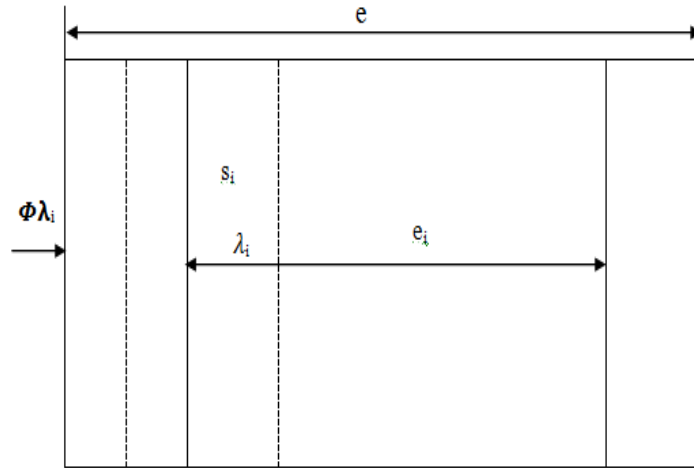
Si on a plusieurs couches (i) de milieux différents mais de formes semblables traversés par un flux de chaleur, on peut distingués deux cas :

### II.2.2.1. Association parallèle :

Lorsque le flux de chaleur circule parallèlement aux différentes couches (i) Fig.II.2 la conductivité est déduite de la relation suivante :

$$\lambda_{eq} \cdot \frac{S_{moy}}{e} = \sum_i \lambda_i \cdot \frac{(S_i)_{moy}}{e_i} \quad (II-10)$$

Dans les cas des géométries différentes, S est remplacé par  $S_{moy}$

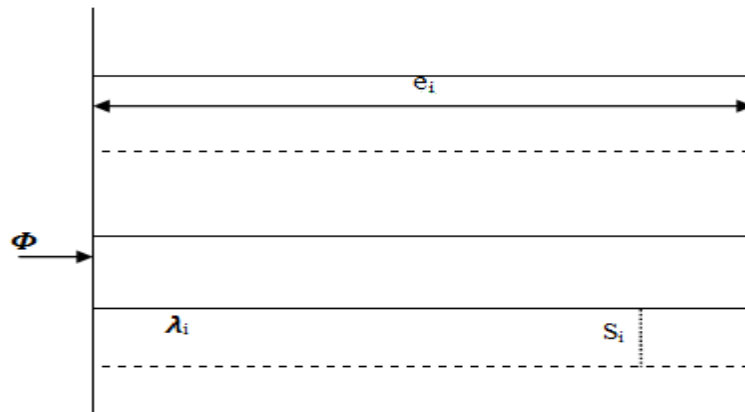


**Fig.II.2.** Association parallèle

**II.2.2.2. Association série :**

C'est le cas où le flux circule en série par rapport aux différentes couches (i), la conduction équivalente se déduit de la relation suivante. Figure II.3

$$\frac{1}{\lambda_{eq}} \cdot \frac{e}{S_{moy}} = \sum_i \frac{e_i}{\lambda_i (S_i)_{moy}} \quad (II-11)$$



**Figure II.3.** Association série

### **II.3. Transfert de chaleur par convection :**

La convection thermique est un transfert de chaleur entre un solide et un fluide ou entre un fluide en mouvement (partie chaude de fluide monte et partie froide descend).

Ce mode de transfert de chaleur 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 :

$$\Phi = h.S.(T_p - T_\infty) \quad (\text{II-12})$$

Avec :

$\Phi$  : flux de chaleur transmis par convection [W].

$h$  : coefficient de chaleur par convection ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ).

$T_p$  : Température de surface du solide ( $^\circ\text{C}$ ).

$T_\infty$  : Température de fluide loin de la surface ( $^\circ\text{C}$ ).

$S$  : Aire de la surface du contact solide /fluide ( $\text{m}^2$ ).

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

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

#### **II.3.1. Convection naturelle:**

Cette convection se produit lorsque le mouvement du fluide apparait naturellement sous l'effet de la variation de la température au sein du fluide lui-même ou entre le fluide et la surface de contact, Ce phénomène se produit généralement sur les culasse extérieures des machines.

#### **II.3.2. Convection forcée :**

Le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante de différence de température (pompe ; ventilateur...etc.) l'étude du transfert de chaleur par convection permet de déterminer l'échauffement de chaleur se produisant entre un fluide et une paroi.

#### **Remarque :**

Un coefficient d'échange thermique élevé permet un bon transfert de chaleur entre le solide et le fluide.

Notons que le coefficient d'échange  $h$ , peut dépendre de plusieurs paramètres : La géométrie, la température, la vitesse, les propriétés du fluide (conductivité ; chaleur spécifique)...etc.

### **II.4. Transfert de chaleur par rayonnement :**

Le rayonnement thermique est constitué d'ondes électromagnétique qui transportent l'énergie émise à la surface d'une substance sans nécessité d'un transport matériel.

Dans les problèmes de conduction on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant.

Conformément à la loi de Stefan-Boltzmann, le flux de chaleur échangé le flux par le rayonnement entre deux corps de température  $T_1$  et  $T_2$ , s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{dQ}{dT} = \epsilon_{12} \sigma S (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{II-13})$$

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

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

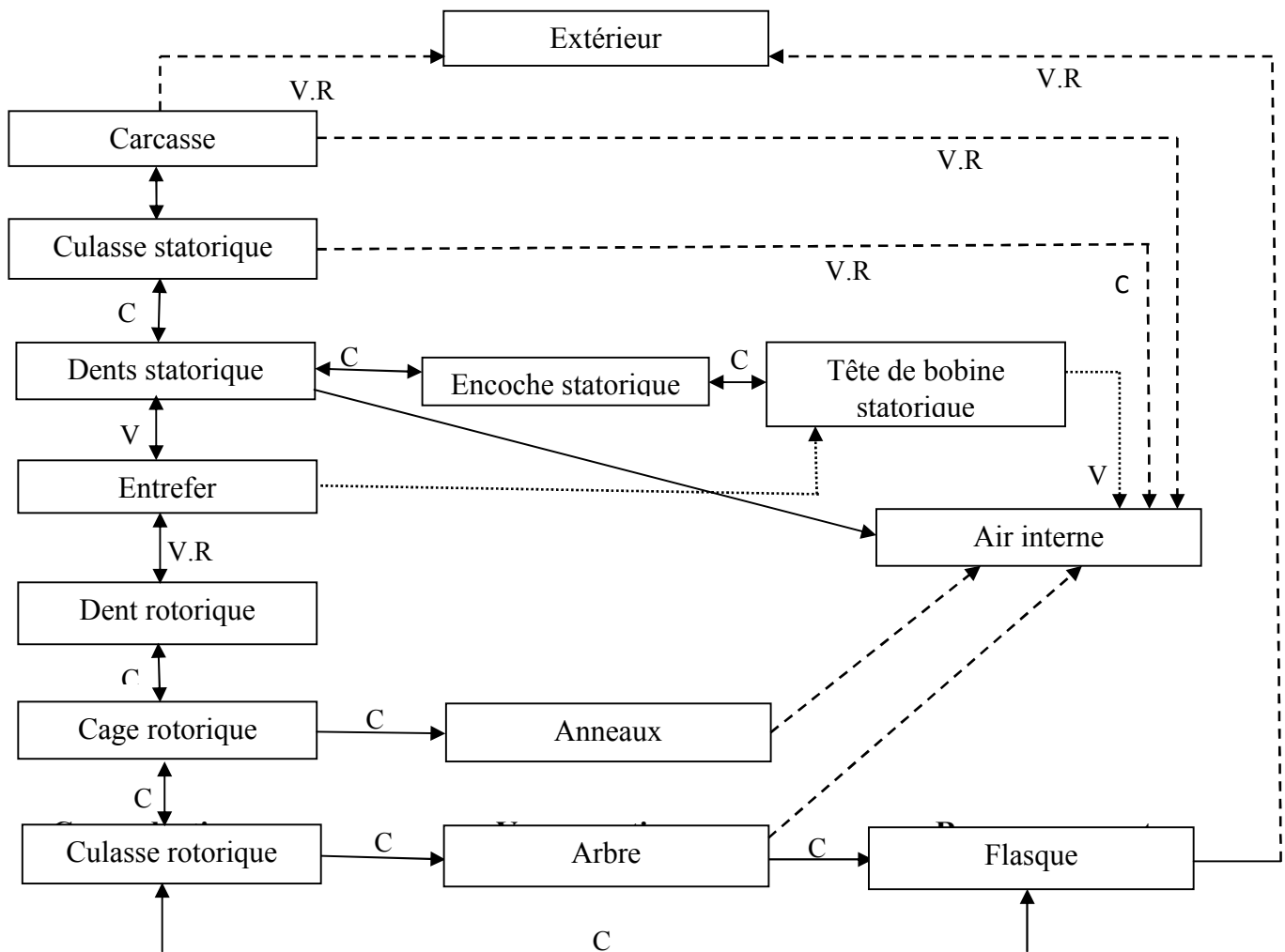
$S$  : surface d'échange [ $\text{m}^2$ ].

### **II.5. Echange thermique dans une machine électrique :**

Une machine électrique présente une très forte hétérogénéité thermique conséquence des propriétés de différents matériaux (divers isolants et conducteur, présences de l'air etc..) qui la constitue [5].

La figure ci-dessous (II-4) représente les trois modes de transferts de chaleur dans une machine électrique : la conduction, la convection et le rayonnement, mais à des proportions différentes selon le cas.

La convection se rencontre surtout sur les extrémités, dans l'entre fer et l'extérieur de la machine. Enfin, le rayonnement est négligeable dans toutes les parties du moteur. On tient à faire remarquer qu'en raison des températures relativement basses, la contribution d'échange radiatif est très mineure [4].



**Fig II-4** Carte générale d'échange thermique d'un moteur asynchrone à cage.

## **II.6. Méthode d'étude thermique :**

Cette méthode intéresse a deux axes principaux :

Le premier est basé sur la détermination de la distribution de la température dans la machine électrique expérimentalement.

Le deuxième concerne la modélisation théorique. Nous distinguons deux techniques :

- La méthode nodale
- Les méthodes numériques

### II.6.1. Méthodes expérimentales :

La méthode expérimentale est l'une des méthodes les plus anciennes et toujours d'actualité, qui reste indispensable pour valider les résultats du modèle théorique.

Pour cette méthode on utilise différents appareils pour mesurer la température pour différentes conditions de fonctionnement, il existe plusieurs moyens et méthodes pour obtenir la température expérimentale. Parmi ceux-ci on cite :

#### II.6.1.1. Méthode calorimétrique :

Cette méthode permet de déterminer les pertes d'une machine électrique. Elle consiste en une infrastructure lourde car il faut mettre cette machine dans une enceinte isolée et mesurer l'énergie calorifique fournie par le système de refroidissement. Son temps de réponse est très lent, requiert l'utilisation de moyens de mesure très précis.

Cette méthode présente des difficultés liées à l'utilisation, comme l'imprécision des appareils de mesure, les pertes de chaleur aux parois de l'enceinte qui emmagasine de l'énergie calorifique, et encore des fuites de chaleur au contact arbre-paroi (défaut d'isolement).

Le schéma d'une telle réalisation est présenté sur la (Fig II-5)

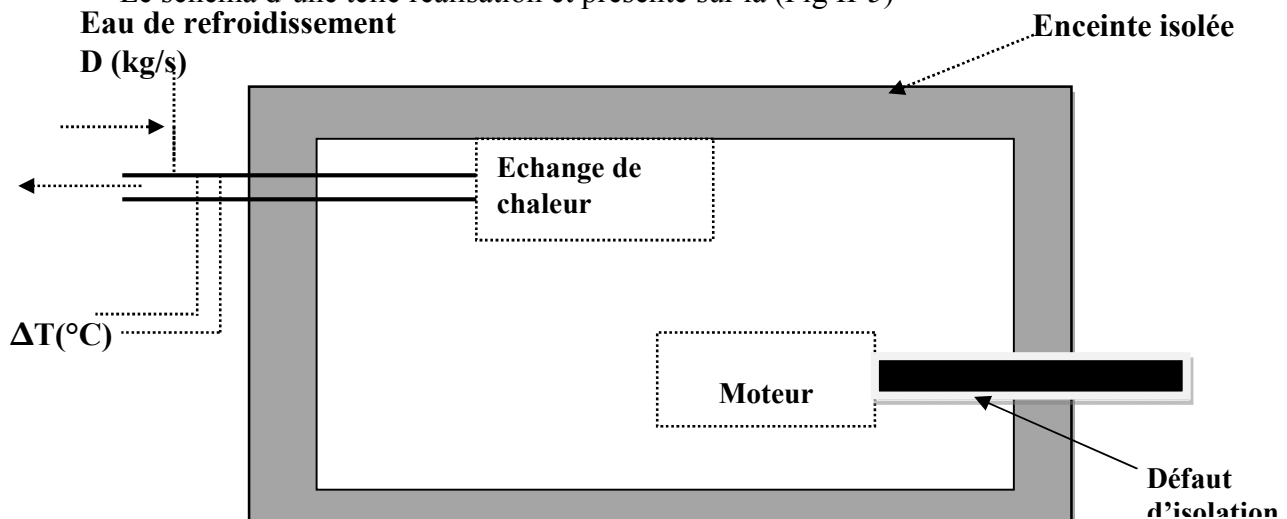


Fig II-5 : Dispositif de mesure calorimétrique

#### II.6.1.2. Mesure de la température par des capteurs:

Ces mesures consistent à placer des capteurs de température en différents endroits de la machine. Les capteurs les plus utilisés étant les thermistances et les thermocouples. L'utilisation d'une telle démarche expérimentale présente des difficultés liées au problème de mise en place des capteurs particulièrement dans la partie interne de la machine (l'entrefer par exemple) [6].

#### 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 dernière permet de mesurer et détecter des tendances thermiques ou variation de température dans la machine ou objet sans contact. Ce type de mesure sans contact permet d'éliminer l'influence du capteur [9].

### II.6.2. Méthodes théoriques :

On utilise ces méthodes pour développer des modèles thermiques, qui après validation par des résultats expérimentaux, vont servir à la conception de nouvelles machines.

#### II.6.2.1. Méthode nodale :

La méthode nodale est basée sur l'analogie électrique-thermique. Son principe consiste à ramener l'étude du comportement thermique à un schéma équivalent en utilisant les notions de résistances et de capacités thermiques. Les pertes constituent alors le courant électrique est représenté par un flux thermique. Les potentiels en différents nœuds donnent les températures. Nous rappelant sur le tableau (II-1) l'analogie thermoélectrique [5].

Tableau II-1 : Analogie thermoélectrique :

Grandeur thermique	Grandeurs électriques
Température	Tension
Capacité thermique	Capacité électrique
Conducteur thermique	Conducteur électrique
Puissance calorifique	Courant électrique

L'utilisation de ces méthodes impose la définition d'un paramètre commun dans les régions solide et fluide. La description des grandes étapes de la réalisation de cette modélisation est la suivante. Découpage de la machine en bloc élémentaire (bobinage statorique, fer statorique et fer rotorique).

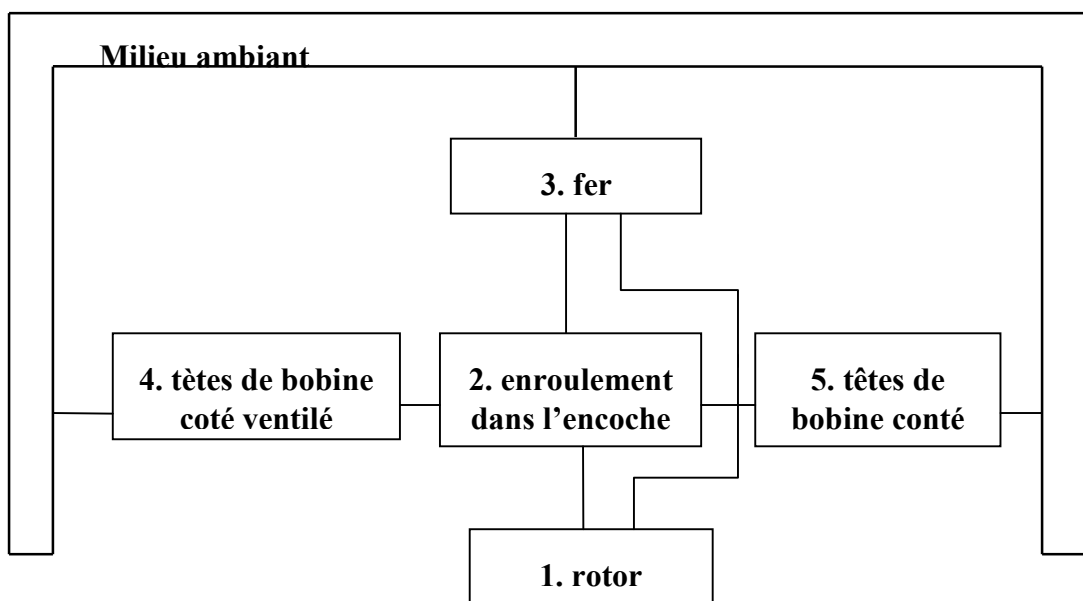


Fig II-6 : Découpage en 5 corps du moteur à induction

On peut déterminer la température au nœud si on est au régime permanent avec la résolution du système suivant :

$$[G]\{\theta\} = \{P\} \quad (\text{II-14})$$

Où :

G : la matrice des conductances thermiques.

$\theta$  : le vecteur de températures inconnues.

P : le vecteur des pertes.

Après avoir discrétisé l'ensemble du domaine, on écrit pour chaque nœud les équations de transfert associées. Ces équations s'écrivent :

$$C_i \cdot \frac{d\theta_i}{dt} = \sum_{j=1}^n G_{ji}(\theta_j - \theta_i) + P_i \quad (\text{II-15})$$

Avec :

$C_i$  : Capacité thermique du bloc i [kJ/kg °C].

$\theta_j - \theta_i$  : Température des blocs i et j [°C].

$G_{ji}$  : Conductance thermique de connexion entre le bloc j et i [W /°C].

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

$$C_i = \rho_i \cdot v_i \cdot c_i \quad (\text{II-16})$$

$\rho_i$  : La masse volumique (kg /m<sup>3</sup>).

$v_i$  : Volume élémentaire du nœud i (m<sup>3</sup>).

$c_i$  : La capacité massique (j /kg. °C).

Les difficultés liées à cette méthode sont:

- ✓ La détermination des coefficients de conductibilité et des capacités thermique dans les matériaux non homogènes ;
- ✓ La localisation des sources de chaleur nécessairement discrète alors que les pertes sont distribuées.

### II.6.2.2. Méthodes numériques :

Les principales méthodes numériques étant les différences finies et les éléments finis. Ces méthodes sont très utilisées dans le domaine thermique. Elles présentent de plus en plus de grands avantages, elles sont basées sur un découpage plus ou moins fin du système modélisé et permettent de tenir compte de plusieurs paramètres (non linéarité, géométrie complexe...), généralement non considérées avec les méthodes analytiques.

### II.6.2.2.1. Méthodes des différences finies :

La méthode des différences finies a trouvé diverses applications dans les domaines traditionnels de la thermique. Cette méthode permet la résolution numérique des équations dérivées de la forme différentielle de l'équation de transfert. A chaque élément est associé un nœud relié aux nœuds voisins par un nombre fini de connexion. La température de chaque nœud est exprimée en fonction de celle des nœuds adjacents.

### II.6.2.2.2. Méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis permet de résoudre des problèmes d'équation aux dérivées partielles. Le principe fondamental de cette méthode réside dans le passage du milieu continu à sa représentation discrétisée. Cela revient à découper la représentation du domaine en ensemble de sous-domaines élémentaires appelées élément finis [5].

#### ✓ Model des équations aux dérivés partielles :

Equation générale de la chaleur [14] :

Considérons un milieu de volume  $V$ . l'état mécanique et physico-chimique de ce milieu est supposé invariable. Soit  $s$  sa chaleur volumique,  $s = \sigma \cdot C_p$  ;  $\lambda$  sa conductivité, et  $P$  la puissance générée par unité de volume due aux sources internes. Les caractéristiques thermiques  $s$  et  $\lambda$  peuvent être fonction du point considéré et de la température en ce point. De plus,  $P$  peut être une fonction du temps. On applique le premier principe de la thermodynamique à un volume finie  $v$ , de surface  $S$ , contenu dans  $V$ , avec les conventions habituelles, on compte positivement les énergies reçues par ce système. Chaleur volumique  $s =$  Masse volumique  $\rho \times$  chaleurs massique  $C_p$ . La quantité de chaleur échangée avec l'intérieur par unité de temps comprend la puissance échangée sur la surface limite  $S$  et la puissance fournie par la source. La puissance traversant  $S$  en chacun de ces points dont le sens de la normale intérieur est donnée par la relation suivante :

$$\varphi \cdot \vec{n} \cdot d\vec{s} \quad \text{(II-17)}$$

L'équation traduisant le premier principe de la thermodynamique s'écrit alors :

$$\int -(\vec{\varphi} \cdot \vec{n}) \cdot ds + \int P dv = \int \sigma \frac{\partial T}{\partial t} dv \quad \text{(II-18)}$$

La formule d'Ostrogradsky permet de transformer l'intégrale de volume :

$$\int [-div \vec{\varphi} + P - \sigma \frac{\partial T}{\partial t}] \cdot dv = 0 \quad \text{(II-19)}$$

$v$  : étant un volume arbitraire de  $V$

On a donc en chaque point de  $V$  :

$$div \vec{\varphi} + \sigma \frac{\partial T}{\partial t} - P = 0 \quad \text{(II-20)}$$

Equation de la chaleur pour un milieu homogène et isotrope [14]

$$\Delta T - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{d\lambda}{dT} (\text{grad} \vec{T})^2 + \frac{P}{\lambda} = 0 \quad (\text{II-21})$$

Pour un milieu de caractéristique  $\lambda$  et  $a$  constantes et pour le quel  $P$  est indépendant de la température, on obtient l'équation linéaire classique de la chaleur.

$$\Delta T - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{P(M,t)}{\lambda} = 0 \quad (\text{II-22})$$

Milieu avec sources internes, en régime permanent

$$\text{Equation de poisson : } \Delta T - \frac{P}{\lambda} = 0 \quad (\text{II-23})$$

Milieu sans sources internes, en régime variable :

$$\text{Equation de Fourier : } \Delta T - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II-24})$$

✓ La condition de Dirichlet :  $T=T_e$

✓ La condition de Neumann, le flux de chaleur est imposé sur la frontière :

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} + q = 0 \quad (\text{II-25})$$

Où  $q$  : flux de chaleur.

✓ La condition d'échange thermique par convection et / ou par rayonnement :

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} + h.(T - T_e) + \sigma.(T^4 - T_e^4) = 0 \quad (\text{II-26})$$

Où  $h.(T - T_e)$  : flux de chaleur par convection et  $\sigma.(T^4 - T_e^4)$  : flux de chaleur par rayonnement.

### II.7. Conclusion :

Nous avons établi dans ce chapitre une représentation de différents modes de transfert thermique dans une machine électrique. Comme les sources de la chaleur se situent dans les corps solide de la machine, l'évolution vers l'équilibre thermique avec le milieu extérieur ce fait essentiellement par conduction et convection thermique.

Les méthodes thermiques sont en générale complémentaire et on ne peut pas négliger l'une par rapport aux autres dans la conception des nouvelles machines.

## **Chapitre III**

# **Moyens de mesure de température dans une machine électrique et étalonnage**

### III.1. Introduction :

La température est une grandeur physique, elle est une mesure de l'agitation des particules plus précisément de leur énergie cinétique. Cette mesure de température n'est pas accessible directement car elle nécessite de prendre en considération tous les endroits des sources de la chaleur dans la machine électrique, elle est mesurée à l'aide des capteurs et des appareils qui se distinguent par le coût des équipements et la précision [10], et leurs mode de fonctionnement nous permet de distinguer trois méthodes de mesure de la température :

- ✓ Méthode de mesure par contact directe.
- ✓ Méthode de mesure sans contact.
- ✓ Méthode de mesure mixte.

### III.2. Méthode de mesure de la température par contact directe :

Cette méthode est utilisée beaucoup plus dans les parties fixes de la machine pour relever la température avec des capteurs qui transmettent l'information de la température par un contact, entre l'élément sensible et le capteur. Cette méthode emploie plusieurs capteurs, entre autres les thermocouples et thermistances

#### III.2.1. Les thermocouples :

##### III.2.1.1. Constitution et principe :

Le thermocouple est un capteur de mesure de la température sur la base de l'effet thermoélectrique, il est constitué d'un circuit formé de deux conducteurs A et B de nature différente réunis à l'une de leur extrémité par une soudure qui sera exposée à la température appelée la jonction de mesure  $T_2$  (fig III-1). Les deux autres extrémités reliées à un appareil de mesure de température appelé la jonction de référence ( $T_1=T_{ref}$ ). Lorsque les deux extrémités sont soumises à des températures différentes, une différence de potentiel apparaît entre les conducteurs  $V_{A/B}^{T_2 T_1}$ . La température est donc mesurable connaissant la température de référence [11].

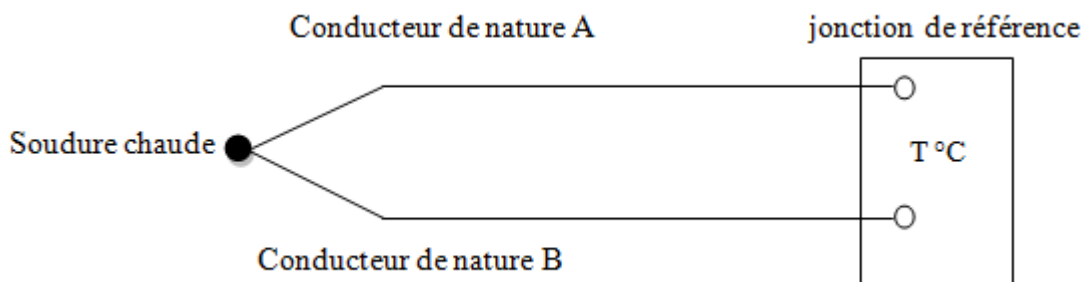


Fig. III.1 Principe d'une réalisation d'un thermocouple.

#### ➤ Effet Seebeck :

L'effet Seebeck décrit la force électromotrice (f.é.m) où  $\Delta$  la tension induite par le gradient de température le long d'un fil. La variation de la f.é.m du matériau par rapport à une variation de

température est appelée coefficient de Seebeck ou sensibilité thermoélectrique. Ce coefficient est généralement une fonction non linéaire de la température [12].

Cependant, pour des petites variations de température sur la longueur d'un conducteur, la tension est à peu près linéaire, ce qui peut être par l'équation suivante

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

Ou :  $\Delta V$  est la variation de tension,  $S$  le coefficient de Seebeck, et  $\Delta T$  la variation de température.

### III.2.1.2. Température de référence d'un thermocouple :

La f.é.m d'un thermocouple dépend à la fois de la température  $T_c$  de la jonction placée au point de mesure et la température  $T_{ref}$  de ces jonction avec les files de liaison. Pour ce qui est de cette dernière, on peut distinguer trois cas :

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

#### a) Température de référence est nulle, $T_{ref} = 0$ :

C'est la température d'équilibre du mélange eau-glace à pression atmosphérique normale. La mesure de la f.é.m du thermocouple permet dans ce cas de connaître immédiatement la température  $T_c$  à l'aide de table du thermocouple utilisé.

#### b) Température de référence est constante et différente de $0^\circ\text{C}$ , $T_{ref} = \text{cst}$ :

La température ambiante peut dépasser les limites de la plage de fonctionnement, pour cette raison on peut alors obtenue la température de référence à l'intérieur d'une enceinte chauffée ou cette température est maintenue constante par régulation à une valeur supérieur à l'ambiante, dans ce cas  $T_c$  n'est pas obtenir directement mais elle se calcule par la relation suivante :

$$V_{A/B}^{T_c 0^\circ\text{C}} = V_{A/B}^{T_c T_{ref}} + V_{A/B}^{T_{ref} 0^\circ\text{C}} \quad \text{(III-2)}$$

$V_{A/B}^{T_{ref} 0^\circ\text{C}}$  : La mesure de la f.é.m du thermocouple fournit une valeur correspondante à  $V_{A/B}^{T_c T_{ref}}$

On en déduit la f.e.m dont le thermocouple serait le siège si la température de référence était de  $0^\circ\text{C}$ .

#### c) La température de référence est variable $T_{ref} = T_{amb}$ :

Connaissant la valeur de la température ambiante  $T_a$  à l'instant de mesure on procède comme dans le cas précédent :

$$V_{A/B}^{T_c 0^\circ\text{C}} = V_{A/B}^{T_c T_a} + V_{A/B}^{T_{ref} 0^\circ\text{C}} \quad \text{(III-3)}$$

Cependant, il existe des circuits, dits de correction de soudure froide, qui délivrent automatiquement une tension  $V(T_a)$ .

### III.2.2. Différents types de thermocouple :

La différence de potentiel est créée lorsque deux métaux de nature différente entrent en contact au niveau de l'une de leurs extrémités et que l'on effectue une mesure de l'autre extrémité. 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, l'autre sert à capturer la température à mesurer.

Le thermocouple le plus précis est constitué de platine et d'un alliage platine plus 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 à la convention ANSI (American National Standard Institute).

**Tableau III-1: des différents types de thermocouples et des 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
Chrome (Cr)	Constantan (C)	Cr/C	E	+1000 °C	37000 à 500 °C
Chrome (Cr)	Aluminium (Al)	Cr/Al	K	+1370	41310 à 1000 °C
Platine (Pt)	Rhodium (Rh)	Pt/Rh	SRB	+1700	10450 à 1000 °C

#### III.2.2.1. Avantage et inconvénient des thermocouples :

##### 1) Avantage :

- Une grande souplesse d'utilisation et non encombrant.
- Robustesse.
- Gamme de température très large.
- Ne nécessite pas une alimentation.
- Une vitesse de réponse élevée.
- Faible coût d'achat.

##### 2) Inconvénients :

- Faible amplitude de signal.
- La température de référence doit être connue.
- Le non linéarité.

- La nécessité d'une correction due à la température de la soudure froide.

### III.2.3. Les thermistances :

#### III.2.3.1. Constitution et principe :

Une thermistance est un élément de détection de température, réalisée à partir d'un matériau semi-conducteur (ex : Manganèse Nickel). Ce composant est une résistance dont la valeur chimique varie en fonction de sa température. Il existe deux types de thermistances (CTP, CTN) tel que :

CTN : Coefficient de Température Négative.

CTP : Coefficient de Température Positive.

Si la thermistance a une résistance qui diminue lorsque la température augmente alors on dit qu'elle est de type CTN (cas le plus courant) et si la thermistance a une résistance qui augmente lorsque la température augmente c'est une thermistance de type CTP [10].

- ✓ Les thermistances CTN ont comme composants principaux le NiO, MnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.
- ✓ Les thermistances CTP sont basées autour du groupe cristallin BaTiO<sub>3</sub>, dont on contrôle la valeur atomique en ajoutant des éléments de terres rares comme Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, et qui devient ainsi un semi-conducteur [5].

#### • Caractéristiques de résistance en fonction de la température :

L'équation de Steinhart-Hart [10] donne une relation entre la résistance de la thermistance et la variation de la température, on la définit comme suit :

$$\frac{1}{T} = a + b * \ln(R) + c * \ln(R)^3 \quad (\text{III-4})$$

Où :

$a, b$  et  $c$  : Sont des constantes fournies par le fabricant de thermistance.

$R$  : Résistance de la thermistance en Ohm.

$T$  : La température en degrés Celsius ou en Kelvin.

Les courbes suivantes représentent les caractéristiques des deux types de thermistances :

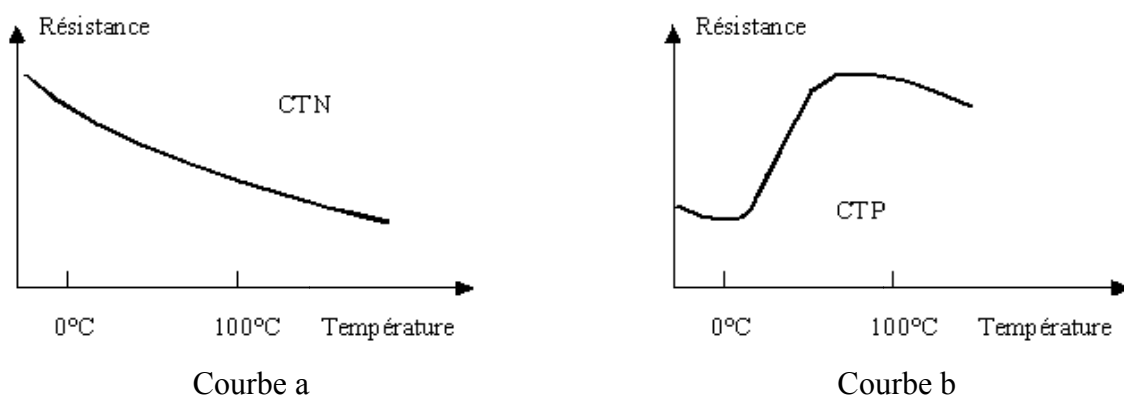


Fig. III.2 Caractéristiques typiques d'une thermistance CTN et CTP.

### III.2.3.2. Avantages et inconvénients des thermistances :

#### a) Avantage :

**Précision :** La thermistance est l'un des types les plus précis des capteurs de température. Les thermistances OMEGA ont une précision de  $\pm 0,1^\circ$ .

**Stabilité :** Les thermistances terminées chimiquement stables et ne sont pas significativement affectées par le vieillissement.

#### b) Inconvénients :

- La thermistance est assez limitée dans sa plage de température, et ne fonctionne que sur une plage nominale de  $-80^\circ\text{C}$  à  $+120^\circ\text{C}$ .

- Non linéarité imposant un étalonnage en plusieurs points.

- Nécessité d'une alimentation et le passage de courant risque de provoquer un échauffement du capteur.

La figure suivante représente les deux types de thermistances :

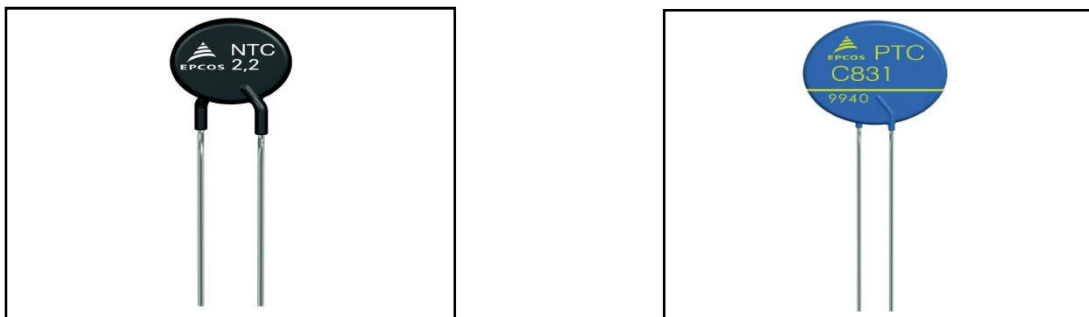


Fig III-3 Photos d'un model de thermistance.

### III.2.3.3. Comparaison entres les thermocouples et les thermistances.

Des études comparant les avantages et les inconvénients des thermocouples et les thermistances, guident le choix de l'utilisation de ces capteurs. On donne sur le tableau (III-2), une comparaison des principales caractéristiques de ces capteurs :

**Tableau III-2 : comparaison des caractéristiques principales des thermistances et des thermocouples**

Caractéristiques	Thermistances	Thermocouples
Précision	Plus précis	Moins précis
Encombrement	Important	Réduit
Coût d'achat	Plus cher	Moins cher
Temps de réponse	Lent	Rapide
Alimentation	Nécessaire	Pas nécessaire
Auto échauffement	Existant	Non existant
Reproductibilité des résultats	Bonne	Moyenne
Stabilité dans le temps	Bonne	Moins bonne
Gamme de température	Réduite	Large
Sensibilité	Peu sensible aux bruits extérieurs	Assez sensible aux parasites

### III.3. Méthode de mesure de température sans contact :

La méthode de mesure sans contact consiste à transmettre l'information de la température et de ses variations sans aucun contact matériel entre l'élément sensible et le point de mesure.

#### III.3.1. Pyrométrie optique :

La pyrométrie optique est un instrument de mesure de la température de surface d'un objet à partir de l'émission de lumière de type corps noir qu'il produit. Le principe de fonctionnement est basé sur la mesure du rayonnement de l'objet dans le domaine de l'infrarouge d'où le nom de thermomètre infrarouge. On utilise également le terme de **pyromètre infrarouge** lorsqu'il s'agit de mesurer des températures élevées d'un objet ou d'un environnement (incendie, four, etc.). Les deux termes expriment la différence avec un thermomètre à contact classique puisqu'ils mesurent le rayonnement thermique émis et non la température elle-même [10].

#### III.3.2. Principe physique :

Le pyromètre infrarouge mesure la température par quantification de l'énergie radiative émise dans l'infrarouge. Tout objet au-dessus du zéro absolu (0 K) émet ces radiations, on connaissant la quantité d'énergie émise par un objet, et son émissivité, sa température peut donc être déterminée. Schématiquement, le procédé consiste à mesurer l'énergie lumineuse (située dans l'infrarouge) sur un détecteur permettant de la convertir en un signal électrique. Cette méthode permet de mesurer la température à distance, contrairement aux autres types de thermomètres comme les thermocouples. Ainsi il est possible de mesurer la température si l'objet est en mouvement, s'il est entouré d'un champ électromagnétique, s'il est placé dans le vide, etc. [11].

Les images suivantes montrent quelques types de pyromètre infrarouge.



**Fig III.5** pyromètre infrarouge.

### III.3.3. Applications du pyromètre infrarouge.

Ce dispositif permet ainsi de mesurer à distance la température d'un objet avec une grande précision. Parmi les applications courantes, on trouve les mesures sur les objets en mouvement, corrosifs, on réacteur sous vide ou soumis à des champs électromagnétiques intenses ainsi que toutes les applications exigeant des temps de réponses très courts.

- Le contrôle de produits alimentaires sous emballage, à condition de ne pas réaliser de mesures dans les poches d'air.
- Le contrôle de la température d'un four ou d'autres équipements.
- La vérification d'équipements mécaniques ou de circuits électriques (exemple : armoires électriques).
- La détection de zones chaudes lors d'un incendie.
- Le contrôle du réchauffement ou du refroidissement de matériaux avec précision ;
- La détection de nuages pour les télescopes.

### III.3.4. Caméra thermique [9].

Une caméra thermique fig III.6, enregistre différents rayonnements infrarouge (ondes de chaleur) émis par les corps et qui varient en fonction de leur température. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, une caméra thermique ne permet pas de voir derrière une paroi ou un obstacle. Elle reproduit la chaleur emmagasinée par un corps, ou montre le flux thermique d'une paroi en raison d'un foyer se trouvant à l'arrière. Bien que la longueur d'onde du rayonnement infrarouge dépend de la température, les caméras thermiques ont, en général, un seul canal (comme une caméra qui filme en "noir et blanc"). Les caméras se contentent de produire une image de l'intensité du rayonnement, qui permet également d'apprécier la température de la source. La couleur produite par la caméra est une fausse couleur, obtenue en associant une couleur à l'intensité reçue, afin de faciliter la lecture directe de la température : à chaque couleur de l'image correspond une température.

### III.3.5. Avantages et inconvénients de la caméra thermique.

#### a) Avantage.

- ✓ Possibilité d'effectuer des mesures de pièces sous tension (composantes électrique ; électronique)
- ✓ Distance de mesure importante.
- ✓ Possibilité d'effectuer des mesures sur des pièces en mouvement (la partie tournante de la machine électrique).

#### b) Inconvénients.

- ✓ La caméra thermique donne une carte de température superficielle. Elle ne permet pas de voir les informations en profondeur.
- ✓ La camera n'indique pas la température thermodynamique de milieu, elle est préalablement étalonnée par le fabricant et une liste des émissivités des différentes matières est fournie.

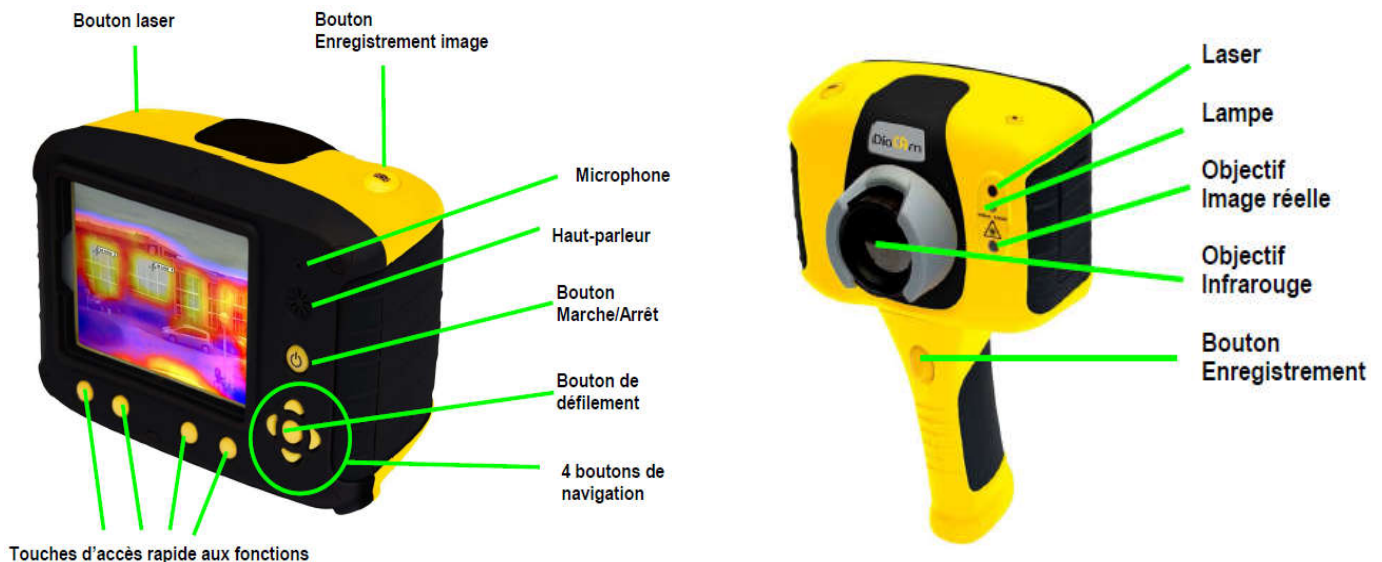


Fig.III.6 photo montrant la camera thermique avec ses principales caractéristiques.

### III.4. Conclusion.

Nous avons présentés dans ce chapitre les différents moyens utilisés pour l'étude thermique expérimentale des machines électriques. A savoir, selon les propriétés de la matière des machines et le phénomène physique sensible à la température. Nous disposons de deux méthodes de mesure : La méthode dite par contact directe, dont on utilise des thermocouples qui se basent sur la variation thermique sous l'effet thermoélectrique, et des thermistances qui traduisent la variation thermique à une valeur d'une résistance. Et la méthode sans contact avec des pyromètres optiques et caméra thermique qui offrent la possibilité de mesure de la température dans quelques endroits de la machine plus facilement que les capteurs par contact, la partie tournante de la machine par exemple. Dans Le chapitre suivant nous exploitons ces différents moyens de mesure pour l'étude thermique de la machine asynchrone.

**Chapitre IV**

**Mesures expérimentales et  
modélisation de la température  
du stator creux**

### **IV.1. Introduction :**

Dans ce chapitre nous cherchons à exploiter les moyens de mesure expérimentale de l'évolution de la température dans le stator creux d'une machine asynchrone à cage. Cette exploitation des différents moyens de mesure a l'objet d'avoir des résultats précis. Pour effectuer cette étude, on utilise deux méthodes expérimentales par les thermocouples et la camera thermique. Les résultats obtenus nous permettrons de valider une étude par simulation à l'aide d'un logiciel FEMM.

### **IV.2. Mesure expérimentale de la température en différent points d'une encoche statorique :**

#### **IV.2.1. Présentation de la machine:**

La machine asynchrone qui fait l'objet d'études est un moteur asynchrone triphasé à cage d'écurieul de 2.2 kw. Le fait que la machine soit déjà construite ne permet pas d'accéder à certains endroits tels que les encoches.

Pour y remédier à ce problème de placement de capteur, on se sert d'un stator creux disponible au laboratoire.

#### **IV.2.1.1. Présentation de stator creux d'études :**

Le stator creux utilisé a les caractéristiques suivantes :

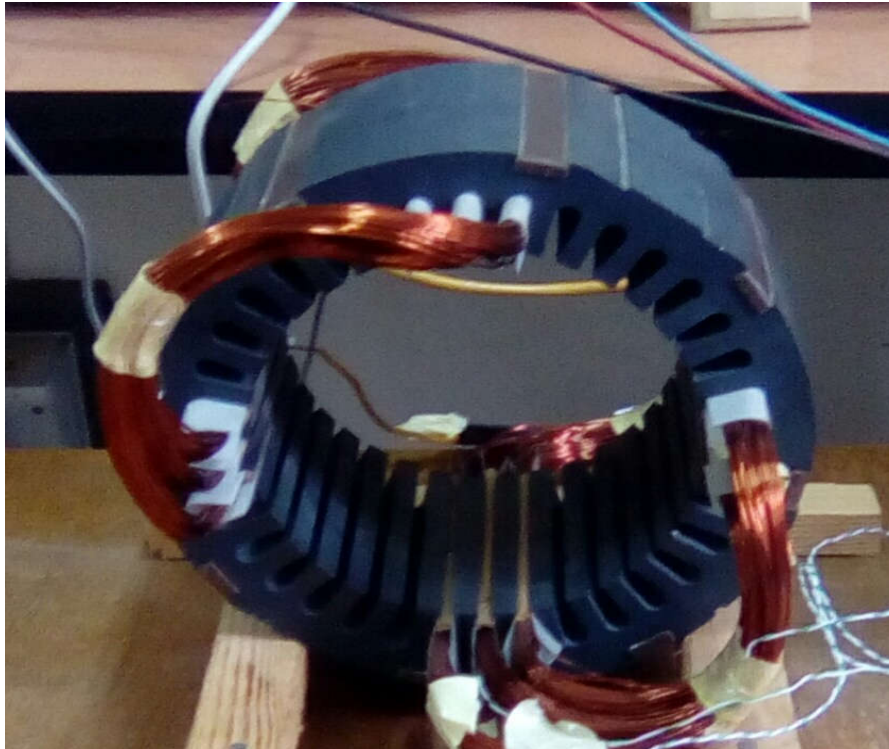
##### **Caractéristiques géométriques :**

- Diamètre extérieur: 170 mm
- Diamètre intérieur: 113 mm
- Longueur de paquet de tôles: 90mm
- Nombre d'encoches: 36 encoches

##### **Caractéristiques électriques :**

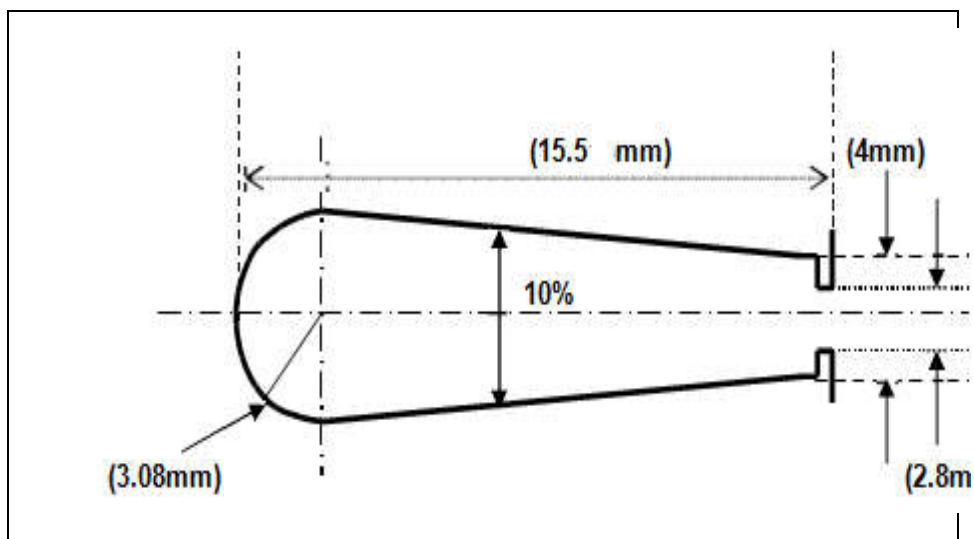
- Courant nominal: 3.1 A
- Puissance: 2.2 kw
- Facteur de puissance  $\cos \theta = 0.83$

La figure suivante nous montre le stator à une seule phase à étudier au laboratoire



**Fig .IV.1 :** photo montre la vue de fesse du 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.2.2. Description du banc de l'essai :**

Le matériel utilisé pour effectuer les mesures de la température sur le moteur asynchrone et le stator est le suivant :

- Source de tension de 380V
- Source de tension de 220V
- Un autotransformateur utilisé comme source de tension alternative variable (0-250V) et de courant variable (0-20A)
- Différents appareils de mesure (ampèremètre, voltmètre, wattmètre, chronomètre, thermomètre à mercure)
- Capteur de température (thermocouple de type k, camera infra rouge)
- Ecopointeur (convertisseur du signal émet par le capteur en affichage numérique de la température).
- Fil de cuivre pour le bobinage, diamètre  $\phi=0,71$  mm
- Papier isolant.
- Bobineuse.

### **IV.2.3. Mesures préliminaires :**

Les mesures préliminaires permettent de s'assurer du bon fonctionnement des appareils et les indications des capteurs. Pour cela on commence par l'étalonnage des instruments des mesures (thermocouples, caméra thermique, thermomètre).

#### **IV.2.3.1. Définition de l'étalonnage :**

L'étalonnage d'un instrument de mesure est une opération consistant à mesurer la même grandeur avec l'équipement à étalonner de l'équipement étalon (four), et à comparer les indications des deux instruments, puis à exploiter les résultats de cette comparaison.

Son exploitation permet, par l'application de corrections systématiques, de réduire l'incertitude associée aux mesures. L'étalonnage engendre un résultat chiffré.

### IV.2.3.2. Etalonnage des instruments de mesures:

Dans cet essai on utilise un four dont la température est connue, cette température nous sert comme température de référence pour étalonner les capteurs, la camera thermique et le thermomètre, dont le schéma et représenter sur la fig.-IV-3

### IV.3. Présentation et principe de l'essai :

Le four utilisé pour l'étalonnage des appareils de mesure de température est une enceinte isotherme, sa température est connue et réglable, à partir de l'ambiante ( $T_{amb}$ ) jusqu'à  $250^{\circ}\text{C}$ . Ce four est alimenté par une source de tension de  $380\text{V}$ , et doté d'un thermomètre numérique indiquant la température qui règne à l'intérieur du four ( $T_f$ ) et une température de référence réglable ( $T_r$ ). On place les trois thermocouples de type K à l'intérieur du four sur trois points différents mais chacun est proche de l'autre, et un thermomètre à mercure ( $T_{thermo}$ ) gradué jusqu'à  $50^{\circ}\text{C}$  qui sert à mesurer la température ambiante pour les essais prochains. Au début de l'essai la température du four est réglée à la température ambiante, soit de  $26,5^{\circ}\text{C}$ .

Cet essai est représenté dans le schéma ci-dessous :

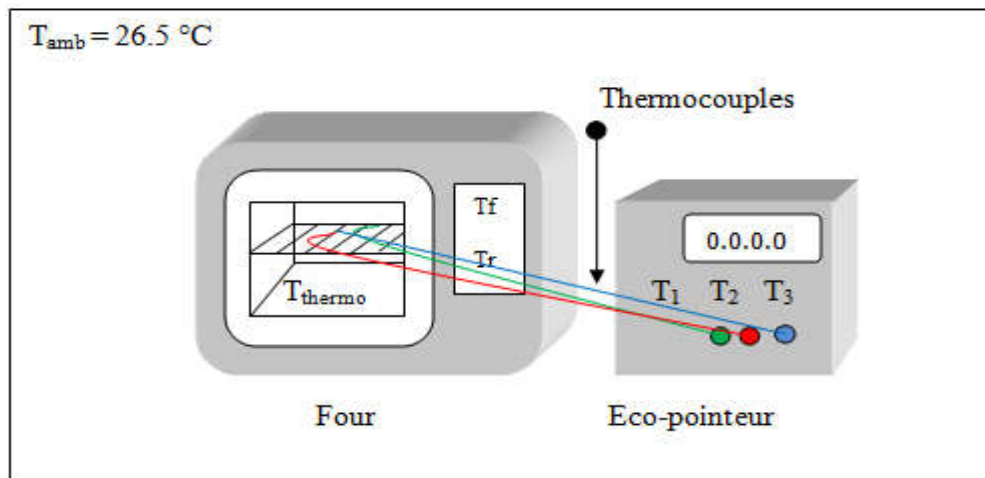


Fig VI.3. Schéma descriptif de l'essai d'étalonnage.

- On prend les valeurs des trois thermocouples et celle du thermomètre ainsi que la camera thermique à l'instant où le four est éteint  $T_{amb} = 26,5^{\circ}\text{C}$ . ( $T_1 = 26,5^{\circ}\text{C}$  ;  $T_2 = 26,4^{\circ}\text{C}$  ;  $T_3 = 26,2^{\circ}\text{C}$  ;  $T_{ther} = 24^{\circ}\text{C}$  ;  $T_{cam} = 26,3$ )

- On met le four en marche et on fait varier sa température, à partir de l'ambient jusqu'à  $80^{\circ}\text{C}$ , par pas de  $5^{\circ}\text{C}$  et on relève les valeurs des trois thermocouples et celle du thermomètre et la camera thermique.

- À partir de ces valeurs on obtient le tracé des courbes suivantes :

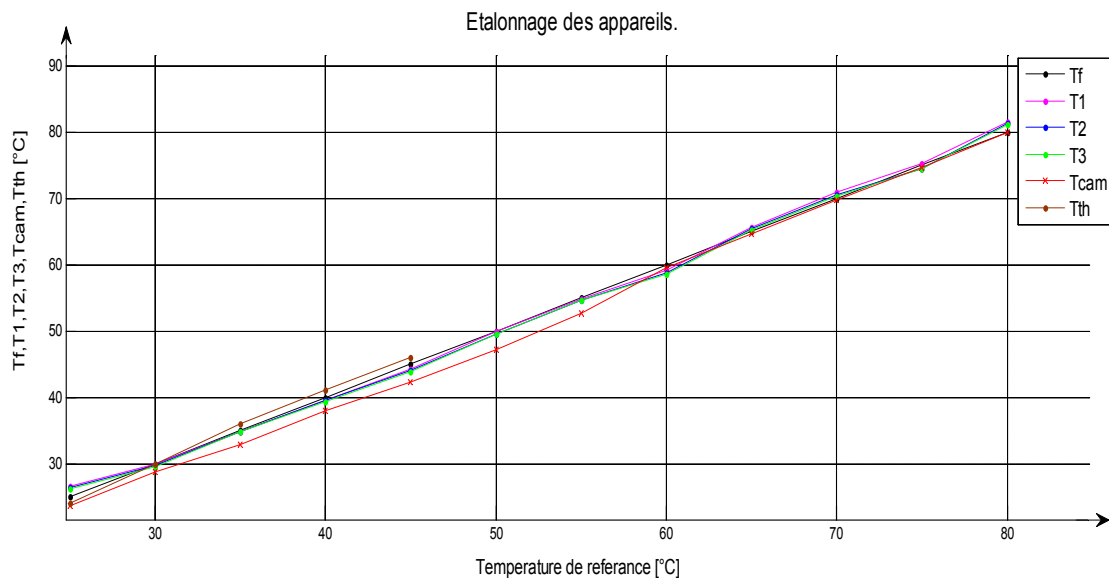


Fig .IV.4. Etalonnage des instruments de mesure de température.

### IV.3.1. Observations :

- On constate qu'au début des mesures les thermocouples présentent un retard de réponse par rapport à la référence, soit environ  $1^{\circ}\text{C}$ . Cette erreur existe lorsque la différence de potentiel entre la soudure de mesure et la soudure de référence est nulle mais avec l'échauffement des capteurs la différence de potentiel augmentent et l'erreur diminue, et la température mesurée par les thermocouples se rapproche de la température de référence du four.

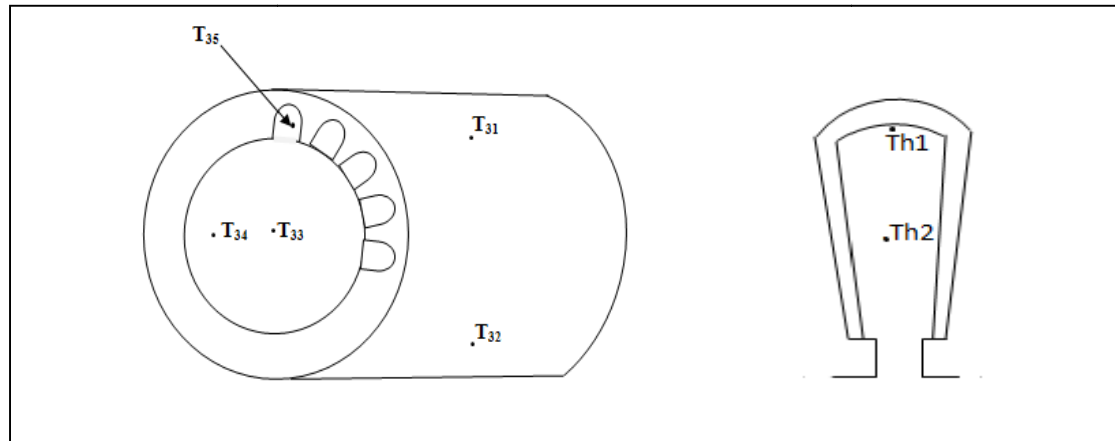
- Le thermomètre à mercure affiche une valeur proche de la température ambiante dans le four ( $26.5^{\circ}\text{C}$ ), puis avec l'échauffement du four il devient en retard de 2 degrés. Comme le thermomètre à mercure est un appareil destiné à mesurer la température ambiante il n'est pas conçu pour répondre au changement rapides de température.

### IV.3.2. Emplacements des thermocouples dans le stator creux :

Avant le montage on place le capteur Th1 au fond de l'encoche, et le capteur Th2 au milieu de l'encoche (entre les fils d'une section à l'intérieur de l'encoche) et Th3 sur la tête de la bobine.

Lorsque les températures atteignent leurs valeurs maximales en régime permanent, on utilise le capteur Th3 pour mesurer la température en différents points du stator comme le montre le schéma de la figure(IV.5) ci-dessous :

La figure ci-dessous montre les différents points du capteur utilisé pour les essais du stator creux alimenté en source de tension.



**Fig IV.5.** Schémas du stator creux et de l'encoche avec différents emplacements du capteur.

Où :

Th1 : au fond et au milieu de l'encoche.

Th2 : au milieu et au centre de la section de la bobine dans l'encoche.

T<sub>31</sub> : le capteur y'est à l'interface du stator coté d'une phase alimentée.

T<sub>32</sub> : est positionné sur l'interface du stator coté non alimenté.

T<sub>33</sub> : c'est le capteur qui est au centre et au milieu de stator creux.

T<sub>34</sub> : est positionné au demi-rayon et au milieu du stator creux.

T<sub>35</sub> : est positionné dans l'axes centrale de l'encoche vide au milieu du stator.

### IV.3.3. Essai préliminaire :

Avant d'alimenter le stator, on a mesuré la résistance de la bobine à la température ambiante 30°C et on a trouvé  $R=10.1\Omega$ . En suite on réalise le montage suivant figIV.6 avec les appareils nécessaires pour étudier l'évolution de la température du stator, puis on alimentant les bobines  $V_1$  et  $V_2$  avec une source monophasé. On maintient le courant afficher par l'ampèremètre constant à 3A. On agissant sur la source de tension à chaque fois si nécessaire jusqu'à ce que le régime permanent thermique soit atteint.

Une fois le régime thermique est établi on relève les indications des appareils de mesure  $V_1=52V$ ,  $P_m= 115W$  et  $I= 3A$ .

En fin , on relève les résultats suivants :dans le voltmètre  $V_1=52v$  et  $P_m=115W$  dans le wattmètre, et on fixe la tension à 52 v.

Le schema suivant represente le montage de l'essai du stator à une phase.

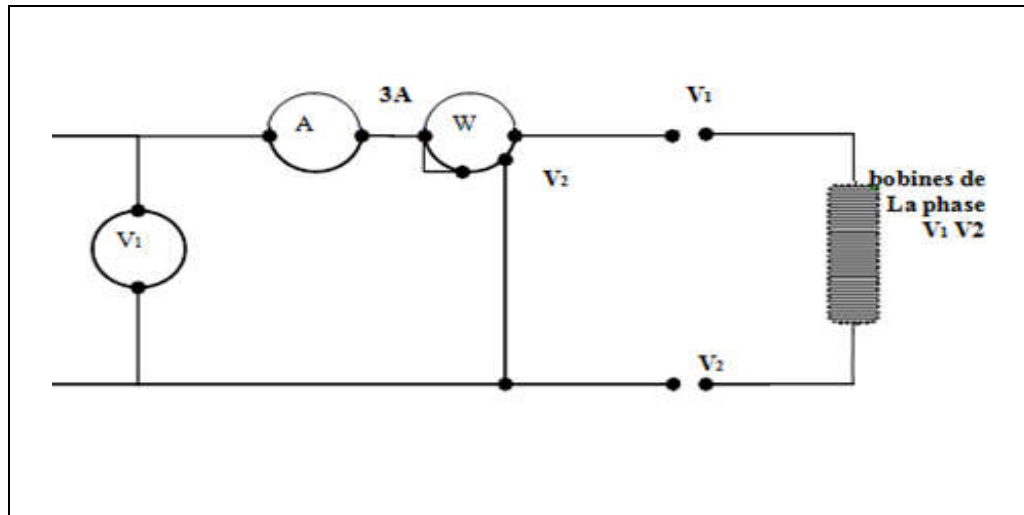


Fig IV.6. Schéma de montage de l'essai du stator à une phase.

#### IV.4. Différents essais expérimentaux effectués sur le stator étudié:

- Essai du stator avec un bobinage avec une seule phase alimentée en monophasé.
- Essai du stator avec un bobinage biphasé (une seule phase alimenté en monophasé).
- Essai du stator biphasé (deux phases alimentées).

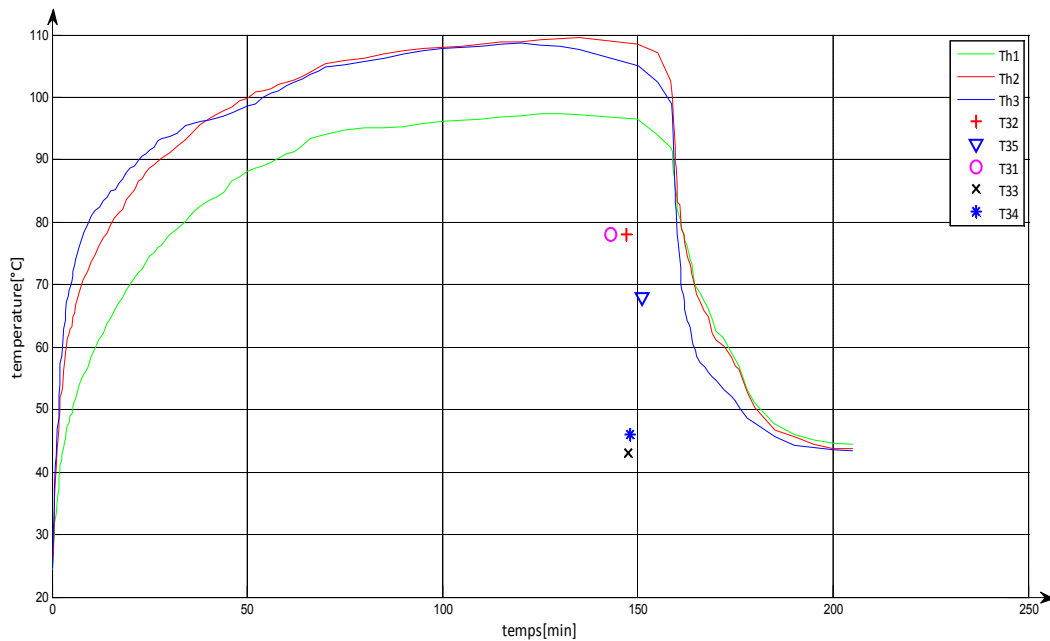
Dans ces trois essais précédemment cités on mesure la température expérimentalement dans différents points du stator avec deux moyens. Les résultats obtenus nous permettrons du valider le modèle thermique basé sur les éléments finis on utilisant le logiciel FEMM.

##### IV.4.1. Essai du stator avec une seule phase bobiné est alimentée en monophasé :

Dans cet essai, on a fixé les mesures selon l'essai préliminaire donné par les appareils de mesure suivant le schéma de montage de la figure (IV.6), dont on a met les thermocouples dans différents points du stator comme est le montre la photo de la figure (IV.1), cela pour mesurer la température par les thermocouples et la camera thermique. On a dessiné un tableau pour enregistrer expérimentalement la température des capteurs voir (fig IV.5) en fonction de temps, en deux temps successifs, le temps d'échauffement et le temps de refroidissement du stator.

##### ➤ Résultats obtenus par la méthode des thermocouples :

Après avoir obtenu les valeurs des températures affichées par l'ecopointeur en fonction du temps par la méthode pratique, puis en utilisant le logiciel Matlab, on aboutir aux résultats suivants :



**Fig IV.7.** Courbes d'échauffement et refroidissement lors de l'essai du stator avec une seule phase bobiné est alimentée en monophasé.

### Observation et interprétation des résultats :

#### 1- Phase de l'échauffement :

- la température ambiante au labo le jour de l'essai est  $T_{amb}=27^{\circ}\text{C}$ , les capteurs affichent  $24.5^{\circ}\text{C}$  avant l'alimentation du stator cela parce que l'écopointeur présente une erreur avant l'échauffement capteurs mais, cette erreur disparaît dès qu'il y a une différence de température entre la soudure chaude et la soudure froide
- Les points de départ des courbes Th1, Th2, Th3 sont à  $27^{\circ}\text{C}$ .
- Après 50 minutes la température affichée par les thermocouples se stabilise à l'intervalle de  $95^{\circ}\text{C}$  à  $110^{\circ}\text{C}$  près. S'il y avait une ventilation on n'aurait pas atteint  $110^{\circ}\text{C}$ .
- On remarque que la chaleur est plus importante dans le milieu de l'encoche (Th2) et la tête de bobine (Th3) qu'au fond de l'encoche (Th1), car les pertes Joules dans le circuit électrique sont très importantes que les pertes fers dans le circuit magnétique.
- Au régime transitoire la température dans la tête de bobine (Th3) augmente plus vite que dans le milieu de l'encoche à cause de la basse température du circuit magnétique. Dès que le circuit magnétique se réchauffe (régime permanent), la température (Th2) devient plus grande que (Th3).

### 2- Phase de refroidissement :

Après la coupure de l'alimentation, la température diminue dans les thermocouples d'une façon plus vite au niveaux de la tête du bobine que celles de l'encoche. Ce qui est due au fait qu'elle est en dehors du stator donc elle est influencée par la condition extérieurs par exemple le courant d'air.

#### ➤ Résultats obtenus par la caméra infrarouge :

#### ✓ Présentation de la camera utilisé :

La camera utilisé dans notre travail est une camera de type C.A 1879, elle est représentée dans la figure suivante :

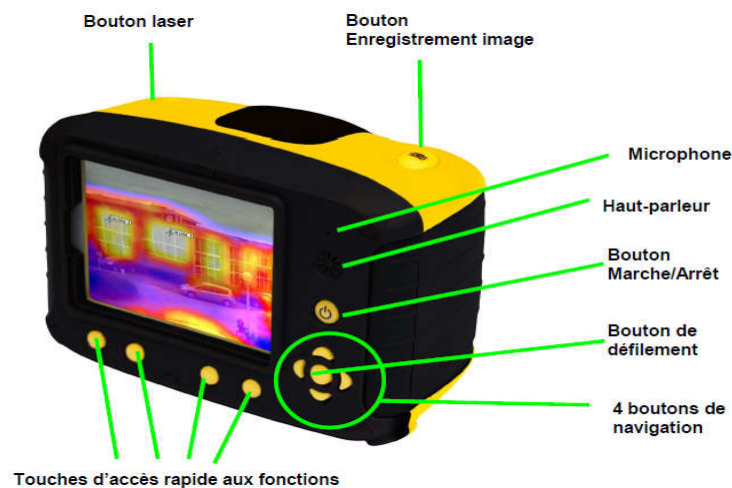



Fig IV.8 Principale caractéristique de commande.

Une fois le régime thermique est établi, on utilise la camera thermique montrer dans la figure ci-dessus, On appuie sur le bouton marche/arrêt pour mettre la caméra sous tension. Pendant la mise au point, une barre de mise au point apparaît à l'écran pour faciliter la manipulation. Elle indique la distance approximative en mètres entre l'objet visé et l'appareil photo.

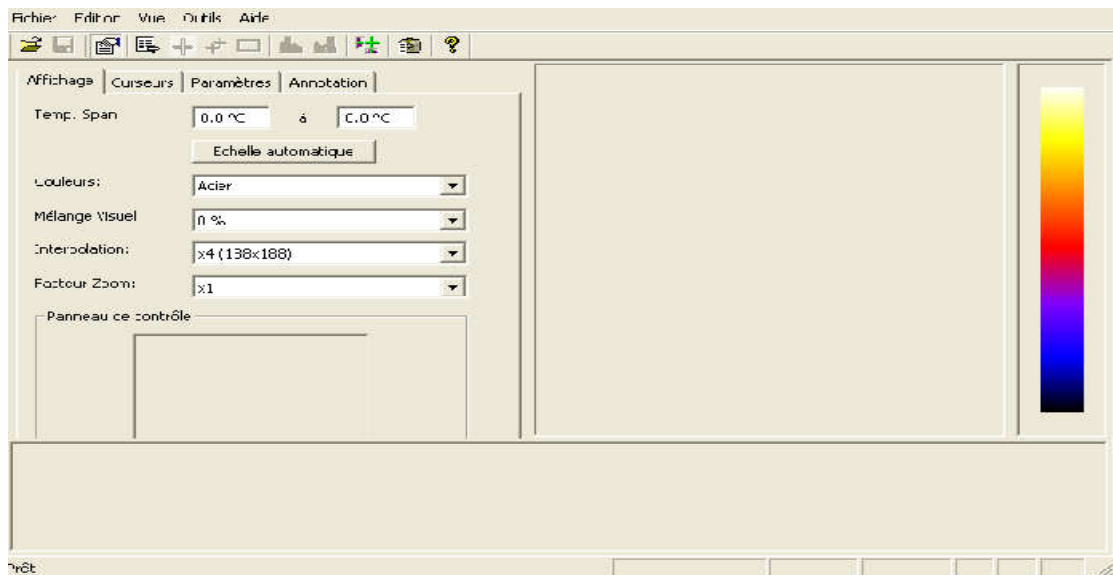
On appuie sur une touche d'accès rapide (fig IV.8) fait apparaître un tableau des valeurs d'émissivité thermique des matériaux et la température réfléchi qui est la température ambiante.

Pour enregistrer une image en direct ou figée, en appuyons une fois sur le bouton enregistrer. Si le mode légende ou commentaire vocal a été activé, une annotation ou un commentaire peut être joint à l'image.

La camera dispose d'un logiciel Dia-Camreport, sur lequel on trouve toutes les notions de fonctionnement de l'appareil.

On clique deux fois sur l'icône Dia Cam report pour démarrer le logiciel .

La fenêtre ci-dessous apparaîtra.

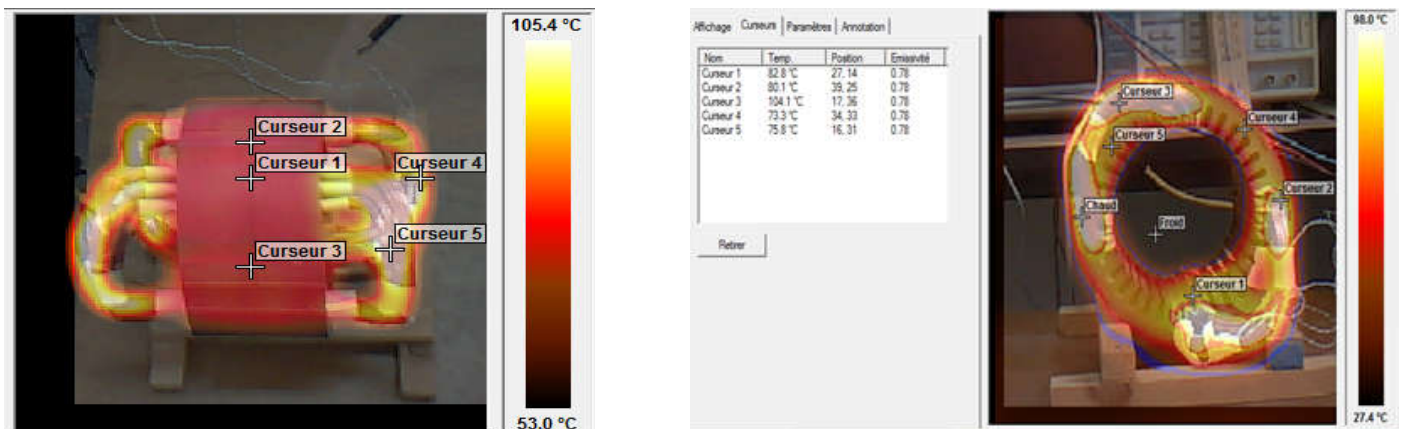


**Fig IV.9.** Fenêtre principale du logiciel.

Pour l'ouverture d'une image, on clique sur le menu déroulant fichier puis sur 'ouvrir'.

Une fois le dossier localisé, on clique deux fois sur l'image que nous souhaitons charger.

Enfin une fenêtre apparaît comme ci-dessous, avec une échelle de température correspondant aux couleurs apparaît à droite de l'image.



**Image A.** vu de profile

**Image B.** vu de face

**Fig IV.10.** Photos vu de profil et vu de face du stator après 140 min de l'essai (avec une phase seulement alimentée).

### **Remarque et interprétation :**

La caméra infrarouge nous montre une différence de température en différents points du stator, la température maximale est engendrée dans les têtes de bobines. Cela est dû certainement aux pertes par effet Joule dans le circuit électrique.

#### **IV.4.1.1. présentation de la structure étudiée :**

Le stator étudié correspond à un stator d'une machine asynchrone à cage d'écureuil triphasée avec le bobinage d'une seule phase.

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

Nombre d'encoche 36

Profondeur de l'encoche 15,58

Ouverture des encoches  $1/3$  du pas dentaire ( $3.4^\circ$ ).

Rayon extérieur:  $170/2 = 85\text{mm}$

Longueur d'induit : 90 mm

Rayon intérieur :  $113/2 = 56.5\text{mm}$

#### **IV.4.1.2. Modélisation thermique par élément finis du stator creux sous le logiciel FEMM :**

##### **✓ Définition du logiciel avec ses étapes :**

Le terme FEMM veut dire en anglais (Finit Elément Méthode Magnetic), est un logiciel 2D qui permet de résoudre des problèmes par éléments finis, la conception des machines asynchrone facilite leurs études. Les problèmes thermiques résolus par ce logiciel sont des problèmes en régime établi du transfert de chaleur soit par convection ou par conduction, des conditions aux limites sont imposés qui peuvent être une température ou un coefficient de la convection.

Comme tous les logiciels des éléments finis en deux dimensions, le logiciel FEMM s'attribue sur trois étapes telle que :

##### **Préprocesseur :**

Il permet de définir la machine à étudier à savoir :

- Dessiner la structure de la machine.
- Définir la nature de problème à résoudre

- Introduction des caractéristiques des différentes régions géométriques de la structure.
- Introduction des conditions aux limites.

### **Le processeur :**

Il effectue la résolution des problèmes défini sur chaque élément de maille processeur (le cas non linéaire). En régime linéaire la résolution du système d'équation 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 récupère les valeurs des grandeurs désirées par exemple dans notre cas d'étude, les valeurs de la température représentés dans la figure (IV.12).

### **✓ Construction 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 dessine les ponts (56.47 ; 1.39), (57.28 ; 1.39), (57.48 ; 2.2) ; (68.93 ; 3.2) ; (68.93 ; -3.2) ; (57.48 ; -2.2) ; (57.28 ; -1.39), (56.47 ; -1.39) pour qu'on puisse dessiner l'encoche puis on duplique 35 fois pour avoir 36 encoches au stator espacés de  $10^\circ$  et on réduit les encoches de 0.18mm pour avoir l'isolation.

Avant la modélisation du problème sous FEMM, nous avons défini toutes les propriétés thermiques des matériaux, leur conductivité thermique suivant les différents axes, voir l'annexe (A).

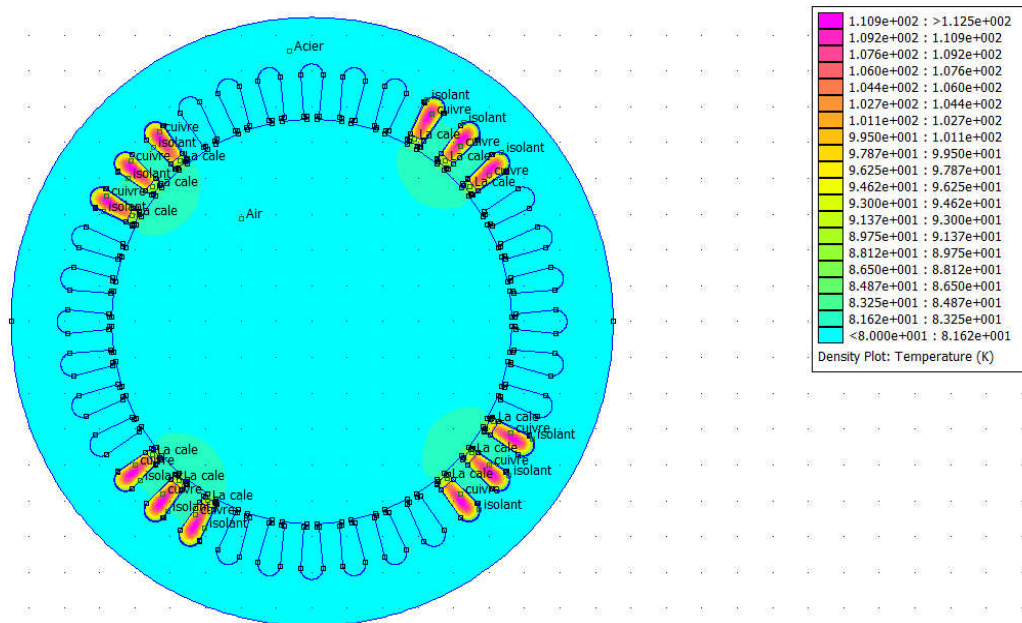
On a fixé la conductivité du cuivre et l'isolant selon l'essai expérimentale, dont on a calculé la température ; où on ajuste sur la conductivité par la simulation pour se rapprocher de la température a été calculée pratiquement.

On a imposé les conditions aux limites, selon les mesures expérimentales par l'écopointeur en différents points du stator.

Puis on a introduit ces paramètres dans Matlab, dont on a calculé les densités de perte du fer (l'acier), et du cuivre (la bobine dans l'encoche), cette procédure est faite pour chaque essai d'étude du stator creux, les programmes sous Matlab sont donnés en Annexe (A) page 1.



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



**Fig IV.12.** Répartition de la température sous FEMM.

**Tableau IV.1.** Montre les températures des différentes méthodes de mesure de température.

Méthodes des mesures de la température	Plage des températures [°C]
Les thermocouples	[43-110]
la caméra thermique	[44.1-104.1]
Simulation par logiciel FEMM	[80-110.9]

**Interprétation des résultats du tableau (IV.1) :**

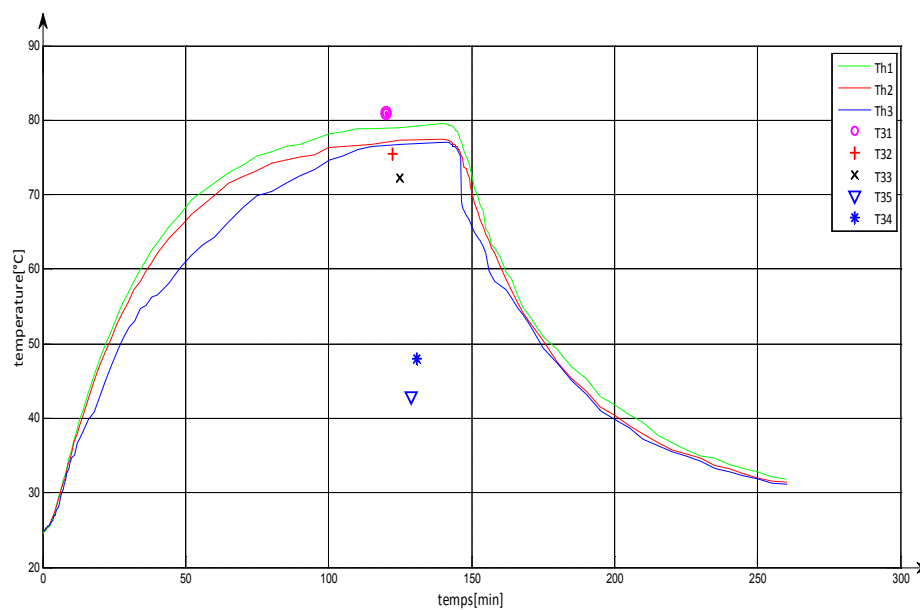
Il existe une légère différence de la température maximale mesuré par les trois méthodes, mais à la température minimale on trouve un écart important dans la simulation, car nous n'avons pas imposés les conditions aux limites à l'intérieur du stator.

### IV.4.2. Essai du stator avec un bobinage biphasé (une seule phase alimentée en monophasé) :

Dans cet essai on a apporté des modifications au stator existant en ajoutant une deuxième phase qu'on a alimenté avec une source monophasée, par contre pour la première phase on la utilisé juste pour mesurer des températures à l'aide des thermocouples déjà utilisés.

#### ➤ Résultats obtenus par la méthode des thermocouples :

On procède de la même manière que l'essai précédent, mais  $Th_1$ ,  $Th_2$  et  $Th_3$  sont placés sur la bobine de la phase non alimentée, on obtient les résultats suivants :



**Fig IV.13.** Courbes d'échauffement et de refroidissement lors de l'essai du stator avec un bobinage biphasé (une seule phase alimentée en monophasé).

#### Observation et interprétation des résultats :

##### 1- Phase de l'échauffement :

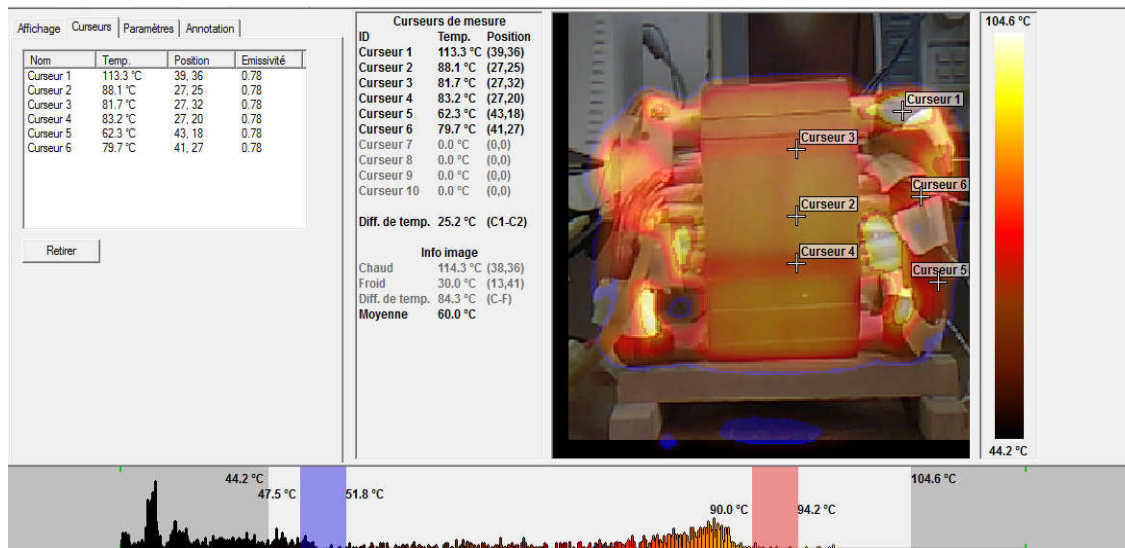
On observe que la température augmente progressivement avec un léger écart entre les thermocouples,  $Th_1$  affiche une valeur maximale par rapport à  $Th_2$  et  $Th_3$ . Ce phénomène est due au transfert de chaleur dans l'acier qui transforme les pertes fer se forme de chaleur ainsi, à l'absence des pertes Joules dans cette bobine qui n'est pas sous tension. Aussi la conductivité thermique dans le fer est grande que celle de l'ensemble bobine, l'isolant et l'air dans l'encoche.

### 2- Phase de refroidissement :

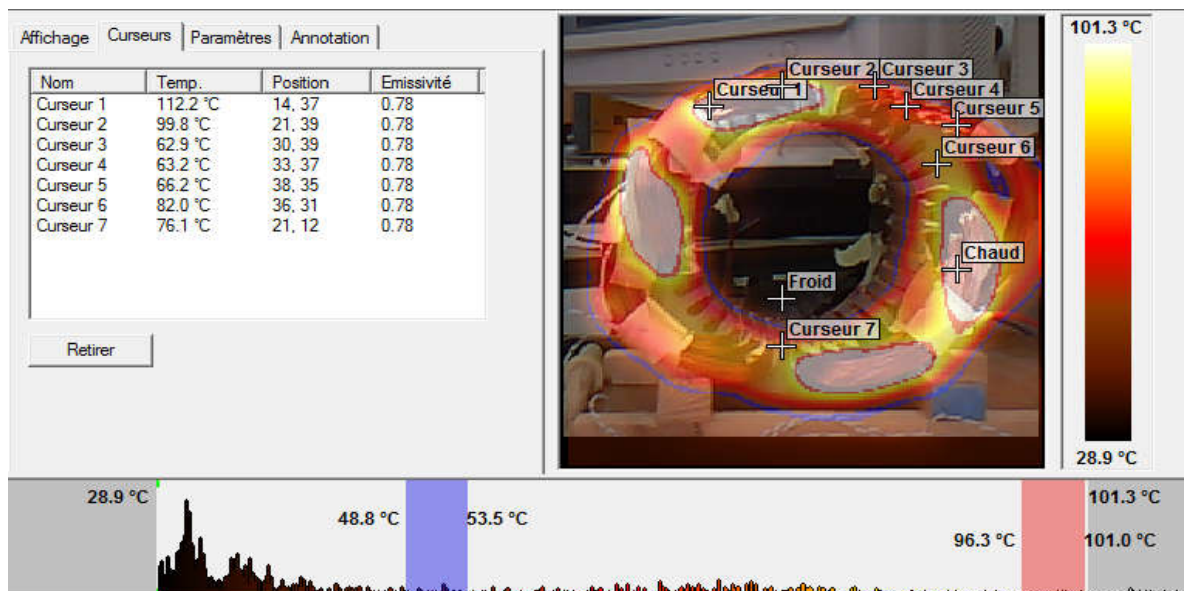
Après la coupure de l'alimentation, la température diminue progressivement de la plus chaude vers l'ambiante, avec un écart très minime.

#### ➤ Résultats obtenus par la caméra infrarouge :

Les deux images suivantes montrent les surfaces de température du stator capter par la camera thermique.



**Fig IV.14.** La Photo montre la vue de profil du stator après 137min de temps de l'essai avec deux phases et une seule phase alimentée.



**Fig IV.15.** La Photo montre la vue de face du stator après 137min de temps de l'essai avec deux phases, une seule phase alimentée.

### Remarque et interprétation :

La caméra infrarouge nous montre une différence de température en différents points du stator, la température maximale est engendrée dans les têtes de bobines alimentées ce là est dû aux pertes par effet Joule dans cette phase, ce phénomène provoque aussi des pertes fer au niveau de l'acier et la deuxième bobine se chauffe par conduction, cette différence de température est due à la différence de conductivité thermique des matériaux (l'acier et le cuivre).

### ➤ Résultat obtenu par la modélisation sous FEMM :

Après le calcul de la température expérimentalement dans différentes régions du stator, on a imposé les conditions aux limites par la méthode des éléments finis pour qu'on puisse étudier l'évolution de la température à l'intérieur et à l'extérieur du stator, pour cela la figure (IV.16) ci-dessous montre la répartition de la température dans le stator.

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

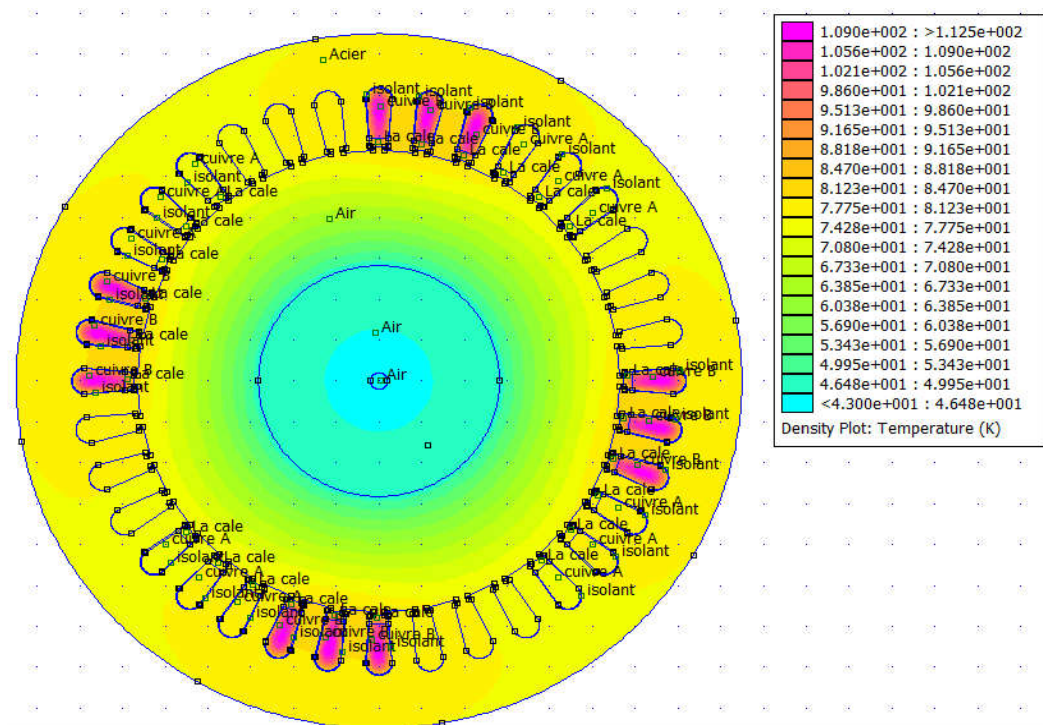


Fig.IV.16. Répartition de la température sous FEMM, avec deux phases, dont une seule phase est alimentée.

**Tableau IV.2.** Montre les températures des différentes méthodes des mesures.

Méthodes des mesures de la température	Plage des températures [°C]
Les thermocouples (bobine non alimentée)	[43.0 82.0]
La caméra thermique	[62.3 113.3]
Simulation par le logiciel FEMM	[43.0 109.0]

### Interprétation des résultats :

Il existe une légère différence de la température mesuré par les trois méthodes, les thermocouples affiche la température dans la phase qui n'est pas alimenter, se qui explique la température inférieure aux autres méthodes, aussi dans la simulation on a imposés les conditions aux limites à l'intérieur du stator dont  $T=43^{\circ}\text{C}$ .

La camera thermique donne une température légèrement supérieur car l'instrument capte des surfaces de matériaux d'émissivité différente.

### IV.4.3. Essai du stator biphasé (deux phases alimentées en triphasé) :

#### IV.4.3.1. Essai préliminaire :

Dans cet essai, on a réalisé une deuxième bobine selon les dimensions qu'on a pris du la première bobine déjà construite, une section de  $L=190\text{mm}$  et  $l=120\text{mm}$ . On a fixé le gabarit du la bobineuse selon ces dimensions de la section. En suite on a réalisé la bobine de 64 spires par section avec 3 sections par bobine.

En fin, on a logé les sections du cette bobine dans les encoches du stator selon les pas des sections, pour facilité la tache, on évite les croisements des fils de la section pendant la construction de la bobine par la bobineuse.

Avant d'alimenté le stator, on a mesuré la résistance totale des 2 phases en série, à la température ambiante de  $30^{\circ}\text{C}$  et on a trouvé  $R=19.1\Omega$ . En suite on réalise le montage suivant Fig.IV.16 avec les appareilles nécessaires dont on a alimenter les deux enroulements avec une source biphasé, on a maintenu le courant afficher par l'ampèremetre constant à 3A. pendant l'essai on agissant sur la tension de la source jusqu'à atteindre le régime permanant où la température des

thermocouples se stabilise. En fin on relève les résultats suivants :dans le voltmètre  $V1=110V$  et  $P_m=225W$  dans le wattmètre, et on fixe la tension à  $115V$ . cela pour étudié l'évolution de la température du stator.

### •Présentation du montage :

Le schéma de la figure (IV.17) montre le montage avec les appareils nécessaires dont on a alimenter les deux enroulements avec une source biphassé.

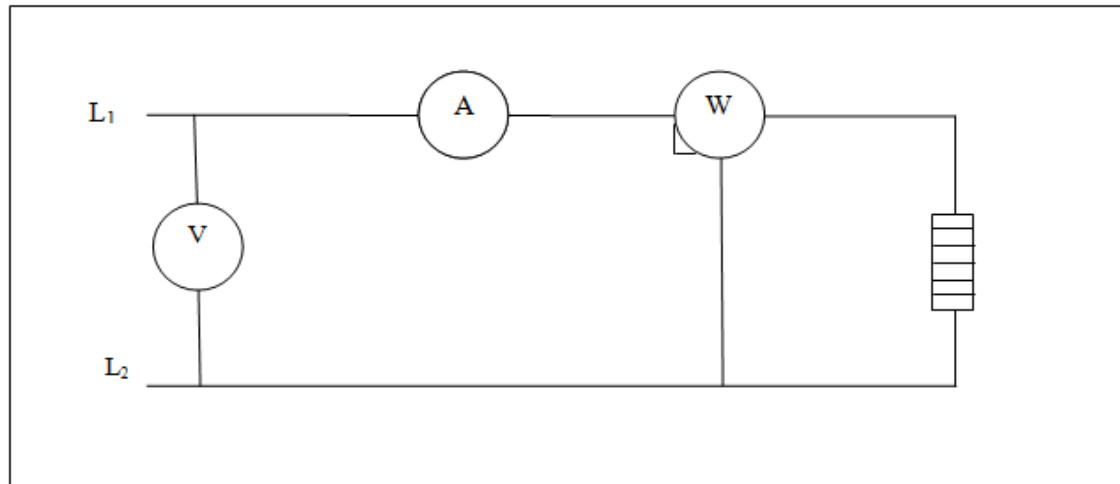


Fig VI.17. Schéma de montage de l'essai de deux bobines mis en série alimentées en biphassé.

### ➤ Résultats obtenus par la méthode des thermocouples :

On procède de la même manière que l'essai précédent et on obtient les résultats suivants :

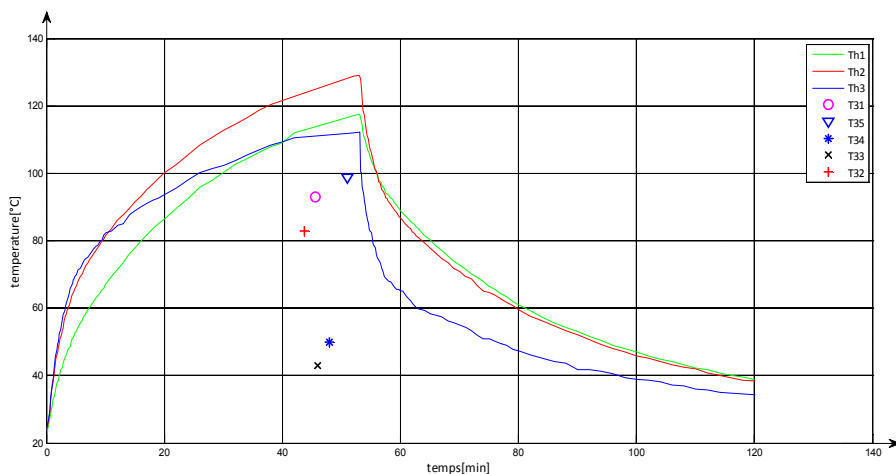


Fig IV.18. Courbes d'échauffement et de refroidissement lors de l'essai du stator avec un bobinage biphassé alimenté en source triphasé.

### **Observation et interprétation des résultats :**

#### **1- Phase de l'échauffement :**

Dans ce cas la température augmente très rapidement parce qu'on a alimenté la deuxième phase (bobine) ce qui multiplie les valeurs des pertes Joules et fer dans la machine.

La température ne stabilise pas car le stator est sans ventilation ce qui ralentit le transfert de chaleur.

On voit que les températures n'ont pas atteint le régime établi, car les thermocouples sont sensibles ce qui a causé la coupure des capteurs à des températures plus élevées.

La chaleur est plus importante dans le milieu de l'encoche et au fond de l'encoche que dans les têtes de bobine.

La courbe de  $Th_3$  augmente lentement de fait qu'elle est en dehors de stator, donc elle est influencée par les conditions extérieures.

On remarque deux croisements, le premier entre  $Th_2$  et  $Th_3$ , dans ce point la constante du temps des températures change car les conditions sont différentes à l'intérieure et à l'extérieur du stator, de plus la température dans l'encoche augmente rapidement. Après 40 minutes de temps on enregistre un deuxième croisement entre  $Th_1$  et  $Th_3$  cela revient à la différence des conditions à l'intérieure et à l'extérieur du stator.

#### **2- Phase de refroidissement :**

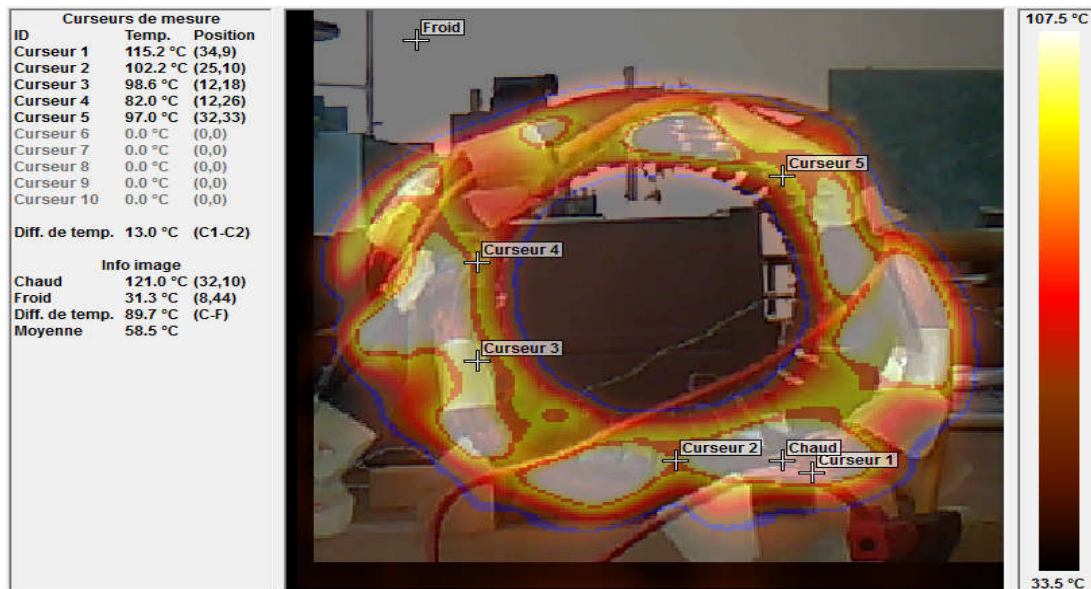
La diminution de chaleur se décroît plus vite dans les têtes de bobine que dans l'encoche, car elle est influencée par les conditions extérieures.

#### **➤ Résultats obtenus par la caméra infrarouge :**

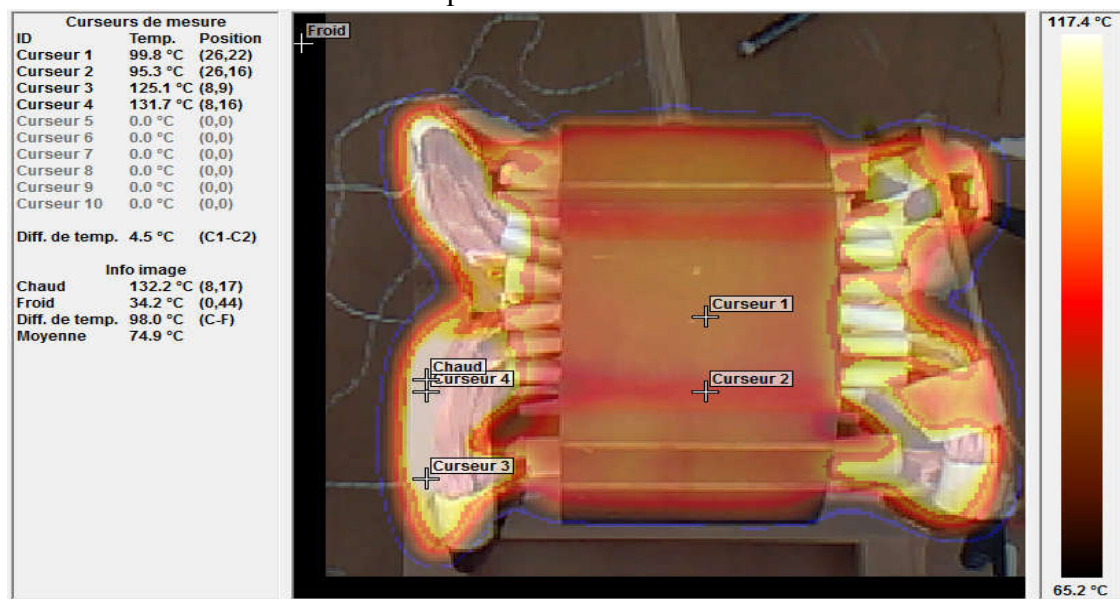
A partir de la caméra thermique on a pu obtenir les résultats de la température au niveau du stator.

Les deux figures suivantes montrent des photos, vue de face et vue de profil du stator après 45 minutes de temps de l'essai avec deux phases alimentées.

Les deux images suivantes montrent les surfaces et les valeurs de la température du stator capter par la camera thermique.



**Fig IV.19.** La Photo montre la vu de face du stator après 45 min de temps de l'essai avec deux phases alimentées.



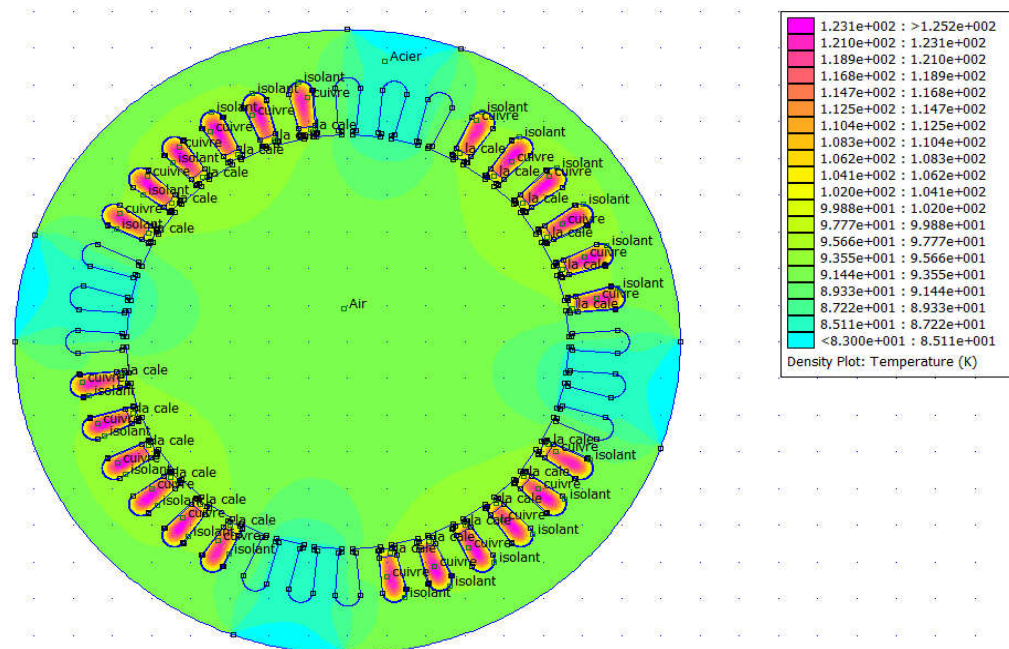
**Fig IV.20.** La Photo montre la vu de profil du stator après 45 min de temps de l'essai avec deux phases alimentées.

### Remarque et interprétation :

La caméra infrarouge nous montre une différence de température légère dans différents points du stator, la température maximale est engendrée dans les têtes de bobines ceci est due aux pertes par effet Joule dans les bobines.

➤ **Résultat obtenu par la modélisation sous FEMM :**

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



**Fig.IV.21.** Répartition de la température sous FEMM.

**Tableau IV.3.** Montrent les plages des températures des différentes méthodes de mesure.

Méthodes des mesures de la température	Plage des températures [°C]
Les thermocouples (dans l'encoche)	[42.0 130.0]
La caméra thermique	[50.0 119.0]
Simulation par le logiciel FEMM	[83.0 123.1]

**Interprétation des résultats de tableau(IV.3) :**

Il existe une légère différence de la température mesuré par les trois méthodes, dans la simulation on n'a pas imposés les conditions aux limites à l'intérieur du stator.

### IV.5. Mesure des pertes fer et Joules :

A l'aide des instruments de mesure qu'on a utilisés dans les trois essais pratiques, et les programmer sur Matlab voir annexe (A), on obtient des résultats figurant dans le tableau ci-dessous.

**Tableau IV.4.** Montre les résultats des pertes dans la machine étudiée pour chaque essai.

Essais pertes	Essai n°1	Essai n°2	Essai n°3
Pertes Joules [W]	115	110	225
Pertes fer [W]	1.8	1.5	2.1

#### Interprétation des résultats du tableau :

On remarque qu'il y a une différence entre les valeurs de pertes dans ces essais, cela est dû à la différence des résistances dans chaque essai.

### IV.6. Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté les essais expérimentaux et les résultats obtenus. Ces derniers nous permettent de connaître le fonctionnement des capteurs et leurs utilisations, et bien sûr de voir et donner une analyse sur la répartition de la température dans les différents points de la machine. Cette dernière, nous montrent que les pertes Joule dans les machines électriques représentent le facteur le plus influant dans l'échauffement, et que la plus part des pertes statoriques sont localisées au niveau des bobines dans l'encoche, cela peut être expliqué par la faiblesse du transfert de chaleur autour des têtes de bobines vu qu'elles sont entourés d'air. Ceci est dû aux pertes Joule qui sont plus importantes que les pertes fer.

On conclure que plus en ajoutant des enroulements de bobine en série, plus les pertes augmentent ; aussi la température se propage dans tout les points de surface de la machine malgré la coupure de la tension d'une phase.



# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

L'étude de comportement thermique dans les machines électriques est très important, elle présente actuellement un très grand intérêt, soit pour le constructeur ou pour l'utilisateur.

Notre travail est consacré aux relevés expérimentaux et modélisation pour déterminer l'échauffement d'une machine asynchrone à cage au niveau du stator creux.

Pour une meilleure détermination de l'échauffement à ce niveau, nous avons opté pour la méthode de mesure par des thermocouples et la caméra thermique.

Les résultats obtenus montrent l'échauffement qui est causé principalement par les pertes joule qui sont dues au passage du courant dans les bobines statorique, Ils montrent aussi que l'élévation la plus importante des températures statoriques est observée au niveau des têtes de bobines.

Nous avons constaté que l'absence de la carcasse présente un effet négatif sur le refroidissement de la machine, ce qui retarde la stabilisation

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

Dans ce mémoire, nous avons fait le calcul de la température d'un modèle physique basé sur la méthode des éléments finis sous environnement FEMM 4.2. Nous avons déterminé théoriquement et expérimentalement différentes densités de pertes fer et pertes Joule.

Une connaissance exacte de la distribution de ces pertes est indispensable pour la détermination précise de l'élévation de la température dans une machine électrique, qui forme l'un des objectifs majeurs de la modélisation thermique des machines électriques. On a constaté que pour imposer les conditions aux limites à l'intérieure et à l'extérieure du stator creux, il est indispensable de connaitre la température dans différents régions.

Enfin, il est à noter 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.

# **Bibliographie**

## Bibliographie

- [1]: **Michel POLOJADOFF** : Machine asynchrone, régime permanent. Technique de l'ingénieur, traité génie électrique. D3480.1998.
- [2] : **Théodore WILDI, Gilbert SYBILLE** : Electrotechnique. 4<sup>eme</sup> et 8<sup>eme</sup> édition. Edition De Boeck.2005.
- [3] : **H.FRAUDET, ETF.MILSANT** : Cours d'électricité. Tome 2\_ Machines. Edition Eyrolles 1981.
- [4] : **Wided .D** : (Conception et dimensionnement des machines asynchrones de petite et moyenne puissance) thèse doctorat en science technique, école polytechnique fédérale de Lausanne, 2001.
- [5] : **K. MEDANE** : « mesure de la température dans le rotor d'une machine asynchrone à cage ». Mémoire de fin d'études, master professionnel, UMMTO, 2014.
- [6] : **MOULAI ZAZI. D** : « contribution à l'étude thermique des machines asynchrones alimentées par des convertisseurs électriques ». Mémoire de magister UMMTO, 2002.
- [7] : **M. BOUAM, M BADJA** : « mesure de la température statorique d'un moteur asynchrone triphasé à cage ». Mémoire, DEUA, UMMTO, 2008.
- [9] : **M. BELMKDAD, S. BERRAH** : « étude expérimentale thermique d'un moteur asynchrone auto-ventilé ». Mémoire, master électrotechnique, UMMTO, 2013.
- [10] : **C.CHEVASSU, G.VALENTEN** : « machine asynchrone cours et problème ». [http://mach.elec.free.fr/mat/cours MAT. pdf](http://mach.elec.free.fr/mat/cours/MAT.pdf). (Version septembre 2014).
- [11] : **G. ASCH** : « les capteurs en instrumentation industrielle »; Dunod, paris, 1999.
- [12] : **S. SIAGHI** : « Mesure de la température dans une encoche statorique d'une machine asynchrone à cage ». Mémoire, master électrotechnique, UMMTO, 2015.
- [13] : **M. L. IDOUGHI** : « Extraction de modèles thermiques simplifiés des machines électriques à partir d'un calcul du champ de températures », Thèse de doctorat, université de Paris Sud, Décembre 2012.
- [14] **J. F. SACAOURA**, « Initiation aux transferts thermiques », Techniques et documentations, décembre 1977.

# **Annexes**

# **Annexe A**

## Essai I :

### I-1 Calcul de la densité de perte du cuivre au niveau des encoches (Dcu) [W/m3] :

```
Nsp=64; %Nombre de spire par section
l1=0.09*Nsp; %Longueur de conducteur [m]
S=0.396*10^-6; %Section totale des fils non isolé [m2]
ro=1.725*10^-8; %La résistivité de cuivre à T=30°C [ohm.m]
Rl=(ro*l1)/S;%La résistance de l'ensemble de fil dans une encoche [ohm]
k=234.5; %Constante de température caractéristique du cuivre à T=30°C
T2=95; %Température finale après l'essai [°C]
T1=30; %Température ambiante avant l'essai [°C]
R0=Rl*((T2+k)/(T1+k)); %La résistance du conducteur dans l'encoche[ohm]
I=3; %Courant simple de la phase [A]
Pj=R0*I^2; %Pertes Joule des conducteurs dans l'encoche [W]
Vcu=l1*S; %Le volume de l'encoche occupé par les conducteurs [m3]
Dcu=Pj/Vcu; %La densité de cuivre dans l'encoche statorique [W/m3]
```

### I-2 Calcul de la densité de perte dans le fer du stator creux (Df) [W/m3] :

```
R=10.1; %La résistance mesurer dans la deuxième phase à T=30°C[ohm]
K=234.5; %Constante de température caractéristique du cuivre à T=30°C
R100=R*((T2+K)/(T1+K)); %La résistance calculer à T=110°C[ohm]
Pjs=R100*I^2; %Les pertes joules dans l'enroulement [W]

Pt1=115; %Perte mesurer par le wattmètre dans la phase B [W]
Pf=Pt1-Pjs; %Pertes fer dans l'acier [W]
Vts=Vcy-Venc; %Volume de paquet de tôle statorique [m3]
Df=Pf/Vts; %Densité de pertes dans le fer [W/m3]
```

%Calcul le volume total des encoches statoriques (Venc) [m3]%

```
Z=36; %nombre d'encoche de stator creux
D=2*3.08e-003; %Largeur maximale de l'encoche[m]
ben1=4e-003; %Largeur minimale de l'encoche[m]
l=0.09; %Longueur de paquet de tôle[m]
bf1=2.8e-003; %La largeur de la dent[m]
hf1=0.66e-003; %Hauteur de la fente[m]
hz1=15.515e-003; %Hauteur de la dent [m]
hen1=hz1-D/2-hf1; %hauteur utile d'encoche[m]
V1=pi*(D^2/4)*1/2; %Volume de demi cercle [m3]
V2=((bf1+ben1)/2)*hz1*1; %Volume de trapèze [m3]
V3=bf1*hf1*1; %Volume de rectangle [m3]
Venc=(V1+V2+V3)*Z; %Volume total des encoches statoriques [m3]
```

%Calcul le volume de cylindre creux (Vcy) [m3]%

```
Dext=0.170; %Diamètre extérieur de stator creux[m]
Dint=0.113; %Diamètre intérieur de stator creux[m]
Vcy=1*pi*(Dext^2-Dint^2)/4; %volume du stator creux [m³]
```

### I-3 Calcul théorique des pertes Joules et fer :

%Les paramètres géométriques, magnétiques et électrique du stator creux à étudié

```
P=2; %Nombre de paire de pole de la machine
U=52; %Tension simple d'alimentation de la phase du stator[v]
f1=50; %La fréquence des phases statorique [Hz]
I=3; %Courant des phases de stator fixe [A]
l=9; %Longueur de paquet de tôle [cm]
li=90; %longueur du paquet de tôle [mm]
Dext=17; %Diamètre extérieur [cm]
De=170; %Diamètre en [mm]
Dint=11.3; %Diamètre intérieur [cm]
Di=113; %Diamètre en [mm]
W1= 384; %Nombre de spire par phase
Tp = (pi*Di)/(2*P); %Le pas polaire[mm]
ai =0.64; %Le coefficient de recouvrement polaire
Kfer=0.985-(5*P*10^-3); %Coefficient de remplissage des tôles
hcl=12; %Hauteur de la culasse [mm]
hc=1.2; %Hauteur de la culasse en [cm]
Bz1=5.5; %Largeur de la dent [mm]
Z1=36; %Nombre d'encoche de stator
t1= (pi*Di)/Z1; %le pas dentaire [mm]
Kdz=1.8; %Coefficient de la dent
Kdc=1.7; %Coefficient totale de majoration des pertes
gama =7.8*10^3; %La masse volumique de la culasse [Kg/m3]
hz1=15.515; %Hauteur de la dent [mm]
P10=2.6; %Pertels spécifiques dans les tôles d'acier à 1 Tesla [W/Kg]
ro=1.725*10^-8; % Résistivité de cuivre à 30°C [ohm.m]
Ro=10.1; %La résistance de fil mesurer par l'ohmmètre à 30°C [ohm]
S=0.396*10^-6; %La section du conducteur nu [m2]
T1=30; %La température ambiante initiale de labo [°C]
T2=90; %La température de fil du cuivre au régime permanent [°C]
K=234.5; %Constante thermique de cuivre à T=30°C
```

%Calcul le poids des dents statoriques [Kg]

```
Gz1=(hz1*Bz1)*(li*Z1)*(Kfer*gama)*(10^-9);
```

%Calcul le poids total de la culasse [Kg]

```
Gcl=pi*(De-hcl)*(Kfer*li*hcl*gama)*(10)^-9;
```

%Calcul de l'induction magnétique dans l'entrefer [T]

```
Be=(0.225*2*P*U*10^6)/(l*Dint*W1*10^4);
```

%Calcul de l'induction de la culasse[T]

```
Bcl=(0.5*ai*Tp*Be)/(Kfer*hcl);
```

%Calcul de l'induction des dents statoriques[T]

```
bz1max=(t1*Be)/(Kfer*Bz1);
```

%Calcul les pertes fer dans les dents statoriques [W]

```
Pfz1=(Kdz*(bz1max^2))*(Gz1*P10)*(f1/50)^1.5;
```

%Calcul les pertes fer dans la culasse statorique [W]

```

Pfcl=(P10*(f1/50)^1.5)*(Kdc*Bc1^2*Gcl);

%Les pertes fer (magnétique) principales d'acier [W]
Pf=Pfz1+Pfcl;

%calcul la résistance de cuivre à T=90°C [ohm]
R=Ro*((T2+K)/(T1+K));

%Calcul des pertes électriques (pertes Joule) [W]
Pjs=R*I^2;
%les pertes totales [W]
Pt1=Pf+Pjs;

```

## Essai II :

### II-1 Calcul de la densité de perte du cuivre au niveau des encoches (Dcu) [W/m<sup>3</sup>] :

```

Nsp=64; %Nombre de spire par section
l1=0.09*Nsp; %Longueur de conducteur [m]
S=0.396*10^-6; %Section totale des fils non isolé [m2]
ro=1.725*10^-8; %La résistivité de cuivre à T=25°C [ohm.m]
R1=(ro*l1)/S; %La résistance de l'ensemble de fil dans une encoche [ohm]
k=234.5; %Constante de température caractéristique du cuivre à T=25°C
T2=90; %Température finale après l'essai [°C]
T1=30; %Température ambiante avant l'essai [°C]
R0=R1*((T2+k)/(T1+k)); %La résistance du conducteur dans l'encoche[ohm]
I=3.1; %Courant de la phase [A]
Pj=R0*I^2; %Pertes Joule des conducteurs dans l'encoche [W]
Vcu=l1*S; %Le volume de l'encoche occupé par les conducteurs [m3]
Dcu=Pj/Vcu; %La densité de cuivre dans l'encoche statorique[W/m3]

```

### II-2 Calcul de la densité de perte dans le fer du stator creux (Df) [W/m<sup>3</sup>] :

```

R=9.2;%La résistance mesurer par l'ohmmètre de l'autre phare T=30°C [Ω]
R90=R*((T2+k)/(T1+k)); %La résistance calculer à T=108°C[ohm]
Pjs=R90*I^2; %Les pertes joules dans l'enroulement [W]

Pt2=110; %Perte mesurer par le wattmetre dans la phase B[W]
Pf=Pt2-Pjs; %Pertes fer dans l'acier [W]
Vts=Vcy-Venc; %Volume de paquet de tôle statorique[m3]
Df=Pf/Vts; %Densité de pertes dans le fer [W/m3]

```

```

%Calcul le volume total des encoches statoriques (Venc) [m3]%

```

```

Z=36; %nombre d'encoche de stator creux
D=2*3.08e-003; %Largeur maximale de l'encoche[m]
ben1=4e-003; %Largeur minimale de l'encoche[m]
l=0.09; %Longueur de paquet de tôle[m]
bf1=2.8e-003; %La largeur de la dent[m]
hf1=0.66e-003; %Hauteur de la fente[m]

```

```

hz1=15.515e-003; %Hauteur de la dent [m]
hen1=hz1-D/2-hf1; %hauteur utile d'encoche[m]
V1=pi*(D^2/4)*l/2; %Volume de demi cercle [m3]
V2=((bf1+ben1)/2)*hz1*l; %Volume de trapèze[m3]
V3=bf1*hf1*l; %Volume de rectangle [m3]
Venc=(V1+V2+V3)*Z; %Volume total des encoches satiriques [m3]

```

```

%Calcul le volume de cylindre creux (Vcy) [m3]%

```

```

Dext=0.170; %Diamètre extérieur de stator creux[m]
Dint=0.113; %Diamètre intérieure de stator creux[m]
Vcy=l*pi*(Dext^2-Dint^2)/4;

```

### II-3 Calcul théorique des pertes Joules et fer :

```

%Les paramètres géométriques, magnétiques et électrique du stator creux
à étudié

```

```

P=2; %Nombre de paire de pole de la machine
U=53; %Tension d'alimentation simple de la phase du stator[v]
f1=50; %La fréquence des phases statorique [Hz]
I=3.1; %Courant des phases de stator fixe [A]
l=9; %Longueur de paquet de tôle [cm]
li=90; %longueur du paquet de tôle [mm]
Dext=17; %Diamètre extérieur [cm]
De=170; %Diamètre en [mm]
Dint=11.3; %Diamètre intérieure [cm]
Di=113; %Diamètre en [mm]
Wl=384; %Nombre de spire par phase
Tp=(pi*Di)/(2*P); %Le pas polaire[mm]
ai=0.64; %Le coefficient de recouvrement polaire
Kfer=0.985-(5*P*10^-3); %Coefficient de remplissage des tôles
hcl=12; %Hauteur de la culasse [cm]
hc=1.2; %Hauteur de la culasse en [cm]
Bz1=5.5; %Largeur de la dent [mm]
Z1=36; %Nombre d'encoche de stator
t1=(pi*Di)/Z1; %le pas d'edentaire [mm]
Kdz=1.8; %Coefficient de la dent
Kdc=1.7; %Coefficient totale de majoration des pertes
gama=7.8*10^3; %La masse volumique de la culasse [Kg/m3]
hz1=15.515; %Hauteur de la dent [mm]
P10=2.6; %Pertels spécifiques dans les tôles d'acier à 1 Tesla [W/Kg]
ro=1.725*10^-8; % Résistivité de cuivre à 30°C [Ω m]
Ro=9.2; %La résistance de fil mesurer par l'ohmmètre à 30°C [Ω]
S=0.396*10^-6; %La section du conducteur nu [m2]
T1=30; %La température ambiante initiale de labo [°C]
T2=90; %La température de fil du cuivre au régime permanent [°C]
K=234.5; %Constante thermique de cuivre à T=30°C

```

```

%Calcul le poids des dents satiriques [Kg]
Gz1=(hz1*Bz1)*(li*Z1)*(Kfer*gama)*(10^-9);

```

```

%Calcul le poid totale de la culasse [Kg]
Gcl=pi*(De-hcl)*(Kfer*li*hcl*gama)*(10)^-9;

```

```

%Calcul de l'induction magnetique dans l'entrefer [T]

```

```

Be=(0.225*2*P*U*10^6)/(l*Dint*W1*10^4);

%Calcul de l'induction de la culasse[T]
Bc1=(0.5*ai*Tp*Be)/(Kfer*hcl);

%Calcul de l'induction des dents statoriques[T]
bz1max=(t1*Be)/(Kfer*Bz1);

%Calcul les pertes fer dans les dents statoriques [W]
Ppz1=(Kdz*(bz1max^2))*(Gz1*P10)*(f1/50)^1.5;

%Calcul les pertes fer dans la culasse statorique [W]
Pfc1=(P10*(f1/50)^1.5)*(Kdc*Bc1^2*Gcl);

%Les pertes fer (magnétique) principales d'acier [W]
Pf=Ppz1+Pfc1;

%calcul la résistance de cuivre à T=100°C [ohm]
R=Ro*((T2+K)/(T1+K));

%Calcul des pertes électriques (pertes Joule) [W]
Pjs=R*I^2;
%les pertes totales [W]
Pt2=Pf+Pjs;

```

## Essai III :

### III-1 Calcul de la densité de perte du cuivre au niveau des encoches (Dcu) [W/m3] :

```

Nsp=64; %Nombre de spire par section
l1=0.09*Nsp; %Longueur de conducteur [m]
S=0.396*10^-6; %Section totale des fils non isolé [m2]
ro=1.725*10^-8; %La résistivité de cuivre à T=30°C [Ω m]
Rl=(ro*l1)/S; %La résistance de l'ensemble de fil dans une encoche [Ω]
k=234.5; %Constante de température caractéristique du cuivre à T=30°C
T2=110; %Température finale après l'essai [°C]
T1=30; %Température ambiante avant l'essai [°C]
R0=Rl*((T2+k)/(T1+k)); %La résistance du conducteur dans l'encoche[ohm]
I=3; %Courant d'une phase statorique [A]
Pj=R0*I^2; %Pertes Joule des conducteurs dans l'encoche [W]
Vcu=l1*S; %Le volume de l'encoche occupé par les conducteurs [m3]
Dcu=Pj/Vcu; %La densité de cuivre dans l'encoche statorique[W/m3]

```

### III-2 Calcul de la densité de perte dans le fer du stator creux (Df) [W/m3] :

```

R=19.1; %La résistance mesurer par l'ohmmètre à T=25°C[ohm]
R110=R*((T2+k)/(T1+k)); %La résistance calculer à T=110°C[ohm]
Pjs=R110*I^2; %Les pertes joules dans l'enroulement [W]
Pt3=225; %La puissance totale mesurer par le wattmetre à T=110°C [W]
Pf=Pt3-Pjs; %pertes fer dans l'acier [W]
Vts=Vcy-Venc; %Volume de paquet de tôle statorique[m3]
Df=Pf/Vts; %Densité de pertes dans le fer [W/m3]
%Calcul le volume total des encoches statoriques (Venc) [m3]

```

```

Z=36; %nombre d'encoche de stator creux
D=2*3.08e-003; %Largeur maximale de l'encoche[m]
ben1=4e-003; %Largeur minimale de l'encoche[m]
l=0.09; %Longueur de paquet de tôle[m]
bf1=2.8e-003; %La largeur de la dent[m]
hf1=0.66e-003; %Hauteur de la fente[m]
hz1=15.515e-003; %Hauteur de la dent [m]
hen1=hz1-D/2-hf1; %hauteur utile d'encoche[m]
V1=pi*(D^2/4)*l/2; %Volume de demi cercle [m3]
V2=((bf1+ben1)/2)*hz1*l; %Volume de trapèze[m3]
V3=bf1*hf1*l; %Volume de rectangle [m3]
Venc=(V1+V2+V3)*Z; %Volume total des encoches statoriques [m3]

```

```

%Calcul le volume de cylindre creux (Vcy) [m3]%

```

```

Dext=0.170; %Diamètre extérieur de stator creux[m]
Dint=0.113; %Diamètre intérieure de stator creux[m]
Vcy=l*pi*(Dext^2-Dint^2)/4;

```

### III-3 Calcul théorique des pertes Joules et fer :

```

%Les paramètres géométriques, magnétiques et électrique du stator étudié

```

```

P=2; %Nombre de paire de pole de la machine
U=56.5; %Tension d'alimentation simple de la phase du stator[v]
f1=50; %La fréquence des phases statorique [Hz]
I=3; %Courant des phases de stator fixe [A]
l=9; %Longueur de paquet de tôle [cm]
li=90; %longueur du paquet de tôle [mm]
Dext=17; %Diamètre extérieur [cm]
De=170; %Diamètre en [mm]
Dint=11.3; %Diamètre intérieure [cm]
Di=113; %Diamètre en [mm]
Wl=384; %Nombre de spire par phase
Tp=(pi*Di)/(2*P); %Le pas polaire[mm]
ai=0.64; %Le coefficient de recouvrement polaire
Kfer=0.985-(5*P*10^-3); %Coefficient de remplissage des tôles
hcl=12; %Hauteur de la culasse [cm]
hc=1.2; %Hauteur de la culasse en [cm]
Bz1=5.5; %Largeur de la dent [mm]
Z1=36; %Nombre d'encoche de stator
t1=(pi*Di)/Z1; %le pas d'dentaire [mm]
Kdz=1.8; %Coefficient de la dent
Kdc=1.7; %Coefficient totale de majoration des pertes
gama=7.8*10^3; %La masse volumique de la culasse [Kg/m3]
hz1=15.515; %Hauteur de la dent [mm]
P10=2.6;%Pertels spécifiques dans les tôles d'acier à 1 Tesla [W/Kg]
ro=1.725*10^-8; % Résistivité de cuivre à 30°C [Ω m]
Ro=19.1; %La résistance de fil mesurer par l'ohmmètre à 30°C [ohm]
S=0.396*10^-6; %La section du conducteur nu [m2]
T1=30; %La température ambiante initiale de labo [°C]
T2=110; %La température de fil du cuivre au régime permanent [°C]
K=234.5; %Constante thermique de cuivre à T=30°C

```

```

%Calcul le poids des dents statoriques [Kg]
Gz1 =(hz1*Bz1)*(li*Z1)*(Kfer*gama)*(10^-9);

%Calcul le poids total de la culasse [Kg]
Gcl=pi*(De-hcl)*(Kfer*li*hcl*gama)*(10)^-9;

%Calcul de l'induction magnétique dans l'entrefer [T]
Be=(0.225*2*P*U*10^6)/(l*Dint*W1*10^4);

%Calcul de l'induction de la culasse[T]
Bcl=(0.5*ai*Tp*Be)/(Kfer*hcl);

%Calcul de l'induction des dents statoriques[T]
bz1max =(t1*Be)/(Kfer*Bz1);

%Calcul les pertes fer dans les dents statoriques [W]
Pz1 =(Kdz*(bz1max^2))*(Gz1*P10)*(f1/50)^1.5;

%Calcul les pertes fer dans la culasse statorique [W]
Pc1 =(P10*(f1/50)^1.5)*(Kdc*Bc1^2*Gcl);

%Les pertes fer (magnétique) principales d'acier [W]
Pf=Pz1+Pc1;

%calcul la résistance de cuivre à T=100°C [ohm]
R=Ro*((T2+K)/(T1+K));

%Calcul des pertes électriques (pertes Joule) [W]
Pjs=R*I^2;
%les pertes totales [W]
Pt3=Pf+Pjs;

```

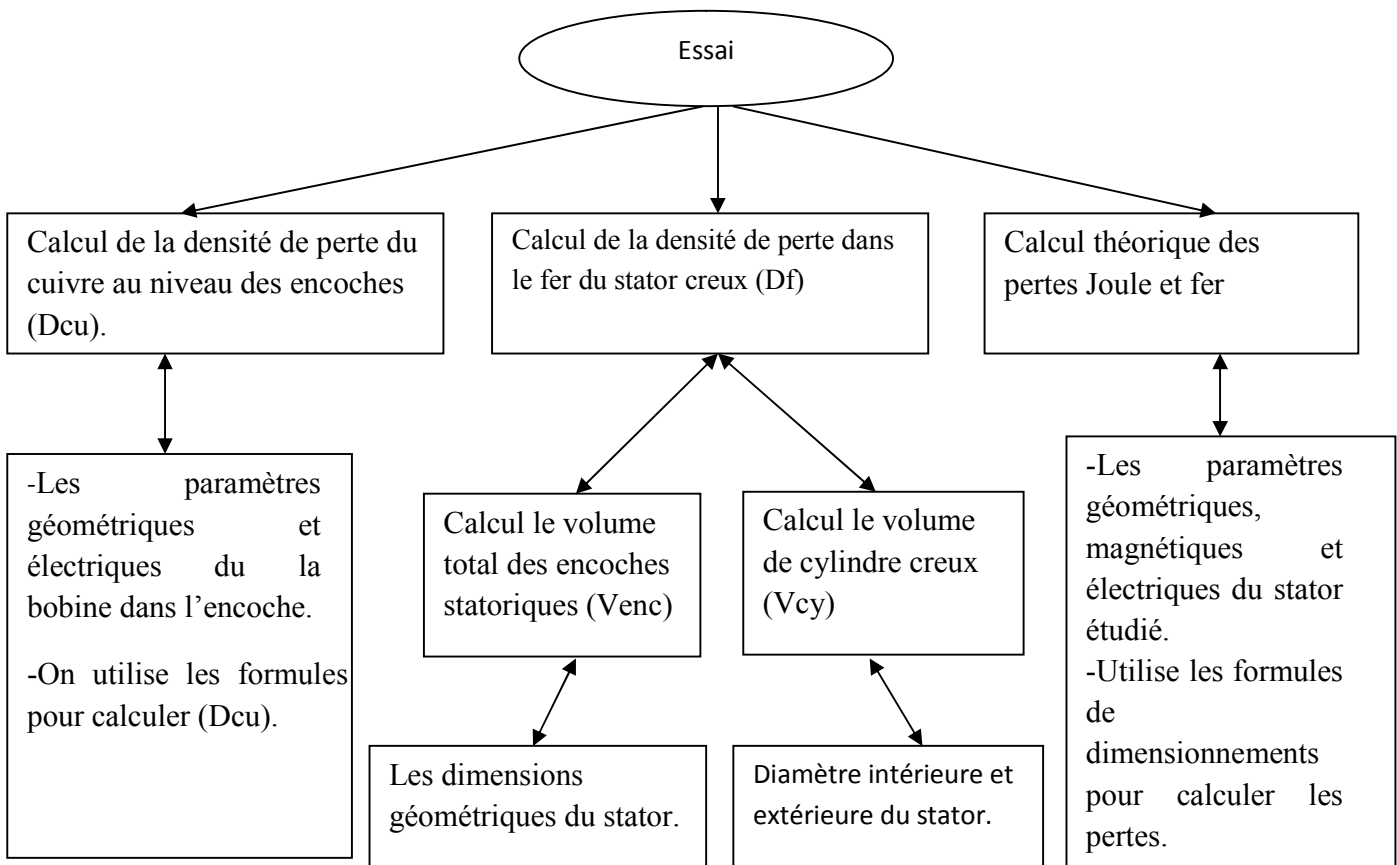
**Tableau 1 : Valeur des conductivités thermiques selon l'axe X et Y**

Conductivité	$K_x$	$K_y$
Air	0.02	0.02
Acier	75	75
Isolant	0.15	0.15
La cale	0.18	0.18
cuivre	0.17	0.17

**Tableau 2 : Résultats des densités des pertes dans l'acier ( $D_f$ ) et dans le cuivre ( $D_{cu}$ )**

Essais Densités	Essai n°1	Essai n°2	Essai n°3
$D_f$ [ $w/m^3$ ]	1674.6	1674.6	1210.4
$D_{cu}$ [ $w/m^3$ ]	1296900	1296900	1289500

Le schéma suivant résume les différents calculs de chaque essai :



## **Résumé :**

Lors de la transformation d'énergie dans la machine asynchrone, cette dernière perd une certaine quantité d'énergie comme les pertes fer, les pertes joules et les pertes mécaniques. Celle-ci se manifeste sous forme de chaleur.

Notre travail est consacré à l'étude expérimentale de l'échauffement d'un stator creux d'une machine asynchrone à cage dans l'objet de mesure et de la modélisation thermique du stator avec le logiciel FEMM, après plusieurs démarches on a conclu que:

Le transfert de chaleur se fait par de différents modes (conduction et convection thermique) et que Les méthodes thermiques sont complémentaires entre elles dans la conception des machines.

Il existe plusieurs méthodes pour les mesures thermiques expérimentales de la machine électrique, voir méthode dite par contact direct (thermocouple) et méthode dite sans contact (caméra thermique).

En utilisant les méthodes précédemment citées on a conclu que les pertes joules représentent le facteur le plus influant dans l'échauffement et que les pertes statoriques se localisent au niveau des bobines.

En ajoutant des bobines supplémentaires en série les pertes augmentent et que la température ne cesse jamais de se propager dans la machine malgré la coupure de la tension.

Les résultats obtenus par les méthodes expérimentales concordent avec ceux de la simulation par FEMM.

## **Mots clés :**

Machine asynchrone, le rotor, le stator, encoche, pertes, chaleur, conductivité thermique, mesure, modélisation, thermocouples, étalonnage, éléments finis.