

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 : Electrotechnique

**Spécialité : M ACHINE ELECTRIQUE**

*Présenté par*  
**Hakim KADI**  
**Abdelghani ABBAS**

Mémoire dirigé par Rabah KHALDI

Thème

# Modélisation et mesure thermique d'un moteur asynchrone sous différentes sources d'alimentation.

*Mémoire soutenu publiquement le 23 Septembre 2018 devant le jury composé de :*

**M Abdelghani KIMOUCHE**  
Maitre-assistant (A), UMMTO, Président

**M Rabah KHALDI**  
Maitre-assistant (A), UMMTO, Encadreur

**M Azzouz MIOUAT**  
Maitre-assistant (A), UMMTO, Examineur

# *Remerciements*

En premier lieu, nos remerciements vont à notre promoteur, **M<sup>r</sup> KHALDI Rabah**, pour son aide précieuse, ses conseils prodigues qui ont mené à la réalisation de ce travail.

Nous remercions les membres du jury, qui nous honorent avec leurs présences et leurs évaluations, **M<sup>r</sup> KIMOUCHE Abdelghani** et **M<sup>r</sup> MIOUAT Azzouz**, qui nous ont aidé et encouragé et pour les conseils qu'ils nous ont fournis.

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont apporté leur aide et leur attention tout au long de la réalisation de notre projet de fin d'étude.

# **DEDICACES**

A mes parents.

A mes sœurs et leurs familles.

A mon frère et sa famille.

A la mémoire de notre camarade **RATIBA**.

Mes amis, OH! combien précieuses personnes:

- **Yassine.**
- **Aghilase.**
- **Bylia.**
- **Lwisa.**
- **Salim.**
- **Hamida.**
- **Rahma.**
- **Hnifa.**
- **Tassadit.**
- **Djidji.**
- **Mouhouche**
- **Aqila**
- **Hassiba**
- **Samira.**
- **Zohra.**
- **Wiza.**
- **Mustapha...**

**ABBAS**

## NOMENCLATURE

$P_f$  : Les pertes fer massique par courant de Foucault [W/ kg].

$K_f$  : Coefficient caractéristique de la tôle.

$e$  : Epaisseur de la tôle [m].

$B_{max}$ : Induction maximale[T].

$f$  : Fréquence du champ tournant résultant [Hz]

$P_h$  : Puissance massique perdue par hystérésis [W/kg].

$K_h$  : Coefficient des pertes par hystérésis (spécifique du matériau).

$P_j$ : Pertes joules [W].

$R$  : Résistance d'une phase [ $\Omega$ ].

$I$ : Courant de ligne [A].

$R_0$ : Résistance à la température de référence  $T_0$  [ $\Omega$ ].

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

$K$ : Coefficient de température caractéristique du matériau [ $^{\circ}\text{C}$ ]<sup>-1</sup>.

$P_{sup}$ : Pertes supplémentaires [W].

$P_{tot}$  : Les pertes totales [W].

$P_{mec}$  : Les pertes mécaniques [W].

$P_{js}$  : Les pertes joules statoriques [W].

$P_{jr}$  : Les pertes joules rotoriques [W].

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

$\vec{\text{grad}}T$ : Gradient de température.

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

$L$  : La distance entre le point i et j [m].

$h$  : Coefficient de transfert thermique [w/m<sup>2</sup>. $^{\circ}\text{C}$ ].

$S$  : Aire de la section traversée par le flux de chaleur [m<sup>2</sup>].

$T_f$  : Température de l'entourage (fluide) [ $^{\circ}\text{C}$ ].

$T_s$  : Température de la surface du corps [ $^{\circ}\text{C}$ ].

$\emptyset$ : Le flux de chaleur [W].

$\varepsilon_p$ : Facteur d'émission de la surface.

$\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann.

$S$  : Aire de la surface [ $m^2$ ].

$T_{ref}$  : Température de référence [ $^{\circ}C$ ].

$T_a$  : Température ambiante [ $^{\circ}C$ ].

$L_{bnv}$  : Longueur moyenne d'une tête de bobine côté non ventilé.

$L_{bv}$  : Longueur moyenne d'une tête de bobine côté ventilé.

$L_{tot}$  : Longueur totale d'un faisceau de conducteur [ $m$ ].

$P_{enc}$  : Les pertes joules dans l'encoche [ $W$ ].

$P_{bv}$  : Les pertes joules dans la tête de bobine côté ventilé [ $W$ ].

$P_{bnv}$  : Les pertes joules dans la tête de bobine côté non ventilé [ $W$ ].

$P_a$  : Puissance absorbée [ $W$ ].

$P_{tr}$  : La puissance transmise au rotor [ $W$ ].

$g$  : Le glissement.

$N_s$  : La vitesse de champ tournant [ $Tr/min$ ].

$N$  : La vitesse mécanique [ $Tr/min$ ].

$V_{enc}$  : volume du cuivre au niveau des encoches [ $m^3$ ].

$S_{fil}$  : Surface d'un fil [ $m^2$ ].

$V_{tb}$  : Volume du cuivre dans les têtes des bobines [ $m^3$ ].

$V_{36enc}$  : Le volume totale des encoches statorique [ $m^3$ ].

$V_{cyl cre}$  : Le volume de cylindre creux du stator [ $m^3$ ].

$V_{ts}$  : Le volume des tôles statoriques [ $m^3$ ].

$V_{Alu}$  : Le volume de l'Aluminium dans la cage rotorique [ $m^3$ ].

$V_{bar}$  : Le volume d'une barre de la cage rotorique [ $m^3$ ].

$V_{tbar}$  : Le volume du somme des barres de la cage rotorique [ $m^3$ ].

$V_{tbar}$  : Le volume d'anneaux de la cage rotorique [ $m^3$ ].

$D_{enc}$  : La densité de pertes au niveau des encoches [ $W/m^3$ ].

$D_{TS}$  : La densité des pertes dans les tôles statorique [ $W/m^3$ ].

$C_u$  : Couple de charge [ $N.m$ ].



# Liste des figures

**Figure.I.1:** Cycle d'hystérésis d'un matériau magnétique.

**Figure.I.2:** Les différents types des pertes dans la machine asynchrone.

**Figure.II.1:** Schéma de transfert de chaleur conductif dans un solide.

**Figure.II.2:** Élément simple d'un circuit thermique.

**Figure.II.3:** Conduction à travers un élément composé.

**Figure.II.4:** Schéma de transfert thermique convectif.

**Figure.II.5:** Schéma de transfert de chaleur radiatif

**Figure.II.6:** Les sources de chaleur dans une machine électrique.

**Figure.II.7:** Carte des échanges thermique dans une machine asynchrone auto-ventilée.

**Figure.II.8:** Principe d'une réalisation d'un thermocouple.

**Figure.II.9:** Les différents types des thermistances.

**Figure.II.10:** La caméra thermique

**Figure.III.1:** La structure du modèle réalisé de la machine étudiée sur Femm.

**Figure.III.2:** La structure maillée du modèle étudié.

**Figure.III.3:** Répartition de la température dans l'essai à vide avec une alimentation sinusoïdale à 50Hz.

**Figure.III.4:** La répartition de la température dans l'essai à vide avec une alimentation non sinusoïdale à 50Hz.

**Figure.III.5:** Répartition de la température dans l'essai en charge avec une alimentation sinusoïdale à 50Hz.

**Figure.III.6:** Répartition de la température dans l'essai en charge avec une alimentation non sinusoïdale à 50Hz.

**Figure.IV.1:** Les courbes d'étalonnage des thermocouples.

**Figure.IV.2:** Banc d'essai.

**Figure.IV.3:** L'emplacement des capteurs dans la machine étudiée.

**Figure.IV.4:** Schéma de montage de l'essai à vide.

**Figure.IV.5:** Courbe de température lors de l'essai à vide.

**Figure.IV.6:** Le refroidissement de la machine par un ventilateur externe indépendant.

**Figure.IV.7:** Schéma de montage de l'essai à vide avec une ventilation indépendante

**Figure.IV.8:** Courbe de température lors de l'essai à vide avec un ventilateur externe.

**Figure.IV.9:** Schéma de montage de l'essai à vide avec onduleur et une ventilation indépendante.

**Figure.IV.10:** Courbe de températures lors de l'essai à vide avec un onduleur à 50Hz et ventilation externe.

**Figure.IV.11:** courbes de température avec les deux alimentations sinus et non-sinus des capteurs TH8 et TH4.

**Figure.IV.12:** Courbe de température lors de l'essai à vide avec un onduleur à 30Hz et ventilateur externe.

**Figure.IV.13:** Courbe de température lors de l'essai à vide avec un onduleur à 10Hz et un ventilateur externe.

**Figure.IV.14:** Schéma de montage de l'essai en charge avec une alimentation sinusoïdale.

**Figure.IV.15:** Courbes de température lors de l'essai en charge avec une alimentation sinusoïdale.

**Figure.IV.16:** Schéma de montage de l'essai en charge avec une alimentation non sinusoïdale.

**Figure.IV.17:** Courbes de température lors de l'essai en charge avec une alimentation non sinusoïdale.

**Figure.IV.18:** Courbes de température avec les deux alimentations sinus et non-sinus des capteurs TH8 et TH4

**Figure.A.1:** Dimensions des Encoches.

**Figure.A.2:** Schéma fonctionnel du variateur fourni par le constructeur.

**Figure.B.2:** Dédution des pertes fer à partir de la courbe Pui abs-Pj en fonction de  $U^2$ .

## Liste des tableaux

- Tableau III.1:** Conductivité thermique des différentes zones de modèle étudié.
- Tableau III.2:** Valeurs de la température dans les différentes parties de la machine.
- Tableau IV.1:** Relevé des valeurs dans l'essai à vide avec une alimentation sinusoïdale et un ventilateur interne.
- Tableau IV.2 :** Relevé des valeurs dans l'essai à vide avec une alimentation sinusoïdale et ventilation externe.
- Tableau IV.3:** Relevé des valeurs dans l'essai à vide avec une alimentation non sinusoïdale à 50Hz et un ventilateur externe.
- Tableau VI.4:** Comparaison entre les différentes grandeurs lors de l'essai à vide avec les deux alimentations sinusoïdale et non sinusoïdale.
- Tableau IV.5:** Relevé des valeurs dans l'essai à vide avec une alimentation non sinusoïdale à 30Hz et un ventilateur externe.
- Tableau IV.6:** Relevé des valeurs dans l'essai à vide avec une alimentation non sinusoïdale à 10Hz et un ventilateur interne.
- Tableau IV.7:** Comparaison des grandeurs dans l'essai à vide alimenté en non sinusoïdale pour les trois fréquences (50Hz, 30Hz et 10HZ).
- Tableau IV.9:** Relevé des valeurs du moteur asynchrone dans l'essai en charge avec une alimentation sinusoïdale.
- Tableau IV.10:** Relevé des valeurs de la génératrice à courant continu dans l'essai en charge avec une alimentation sinusoïdale.
- Tableau IV.11:** Relevé des valeurs du moteur asynchrone dans l'essai en charge avec une alimentation non sinusoïdale.
- Tableau IV.13:** Relevé des valeurs pour les deux types d'alimentation sinusoïdale et non sinusoïdale.
- Tableau IV.14 :** Comparaison des résultats simulés et mesurés dans l'essai à vide avec une alimentation sinusoïdale à 50Hz.
- Tableau IV.15:** Comparaison des résultats simulés et mesurés dans l'essai à vide avec une alimentation non sinusoïdale à 50Hz.
- Tableau IV.16:** Comparaison des résultats simulés et mesurés dans l'essai en charge nominale avec une alimentation sinusoïdale à 50Hz.
- Tableau IV.17:** Comparaison des résultats simulés et mesurés dans l'essai en charge nominale avec une alimentation non sinusoïdale à 50Hz.
- Tableau A.1:** Caractéristiques nominales de la machine étudiée
- Tableau A.2:** Dimensions de la carcasse
- Tableau A.3:** Dimensions du stator
- Tableau B.1:** Calcul des pertes joules à partir des différentes grandeurs relevés de l'essai à vide.

## Nomenclature

## Liste des figures

## Liste des tableaux

## Introduction générale ..... 1

### **Chapitre I : Différentes pertes dans un MAS à cage alimenté par une source sinusoïdale et non sinusoïdale**

I.1 Introduction.....	3
I.2 Les pertes dans le moteur alimenté en tension sinusoïdale .....	3
I.2.1 Les pertes fer .....	3
I.3 Les pertes mécaniques .....	5
I.4 Les pertes joules .....	5
I.5 Les pertes supplémentaires .....	6
I.6 Les pertes dans le moteur alimenté en tension non sinusoïdale.....	7
I.7 Conclusion .....	8

### **Chapitre II : Modes de transfert de chaleur, méthodes d'études thermiques et moyens de mesure de température dans une machine asynchrone**

II.1 Introduction .....	9
II.2 Les modes de transfert de chaleur .....	9
II.2.1 Le transfert de chaleur par conduction .....	9
II.2.1.1 La relation de fourrier .....	9
II.2.1.2 La conductivité thermique .....	10
II.2.1.3 La conductivité thermique des solides hétérogènes .....	10
II.2.2 Le transfert de chaleur par convection .....	13
II.2.3 Le transfert de chaleur par rayonnement .....	15
II.3 Application à la machine étudiée .....	15
II.4 Les moyens de mesure de températures .....	17
II.4.1 La méthode de mesure avec contact .....	17
II.4.1.1 Les thermocouples .....	17
II.4.1.2 Avantage et inconvénient de thermocouple .....	18
II.4.1.3 Les thermistances .....	19
II.4.1.4 Avantage et inconvénient de la thermistance .....	19
II.4.2 La méthode de mesure sans contact .....	19
II.4.2.1 Principe de fonctionnement de la caméra thermique .....	20
II.4.2.2 Avantages et inconvénients de la caméra thermique .....	20
II.5 Les méthodes d'étude thermique .....	20
II.5.1 Les méthodes théoriques .....	21
II.5.1.1 Les méthodes nodales .....	21
II.5.1.2 La méthode des éléments finis .....	21
II.5.2 Les méthodes expérimentales .....	22
II.6 Conclusion .....	22

## **Chapitre III : Etude du modèle thermique d'un moteur asynchrone à cage par la méthode des éléments finis(Femm) sous différentes sources d'alimentation**

III.1 Introduction .....	23
III.2 Présentations de logiciel FEMM .....	23
III.3 La structure du modèle étudié et les hypothèses de travail .....	24
III.4 Hypothèses de travail .....	24
III.5 Evaluation des paramètres thermo-physique.....	25
III.5.1 La conductivité thermique .....	25
III.5.2 Les densités de pertes .....	25
III.5.3 Le maillage.....	26
III.6 Résultats de la simulation .....	27
III.6.1 Essai à vide avec une alimentation sinusoïdale à 50Hz.....	27
III.6.2 Essai à vide avec une alimentation non sinusoïdale à 50 Hz .....	27
III.6.3 Essai en charge avec une alimentation sinusoïdale à 50 Hz .....	28
III.6.4 Essai en charge avec une alimentation non sinusoïdale à 50 Hz.....	28
III.7 Interprétation des résultats .....	29
III.8 Conclusion.....	30

## **Chapitre IV : Mesure de température d'un moteur asynchrone sous différentes charges et sources d'alimentation**

IV.1 Introduction .....	31
IV.2 Etalonnage des thermocouples .....	31
IV.3 L'enregistreur de température (écopointer) .....	31
IV.4 Présentation de la machine asynchrone étudiée .....	32
IV.5 Description de banc d'essai.....	33
IV.6 L'emplacement des capteurs dans la machine asynchrone.....	34
IV.7 Essai à vide avec un ventilateur externe .....	35
IV.8 Essai à vide avec onduleur et un ventilateur externe.....	39
IV.8.2 Essai à 50 Hz.....	38
IV.8.3 Comparaison entre l'alimentation sinusoïdale et non sinusoïdale à 50Hz .....	41
IV.8.4 Essai à 30HZ .....	42
IV.8.5 Essai à 10Hz.....	43
IV.9 Essai en charge .....	44
IV.9.1 Essai à 50Hz en charge nominale avec une alimentation sinusoïdale.....	44
IV.9.2 Essai à 50Hz en charge nominale avec une alimentation non sinusoïdale .....	46
IV.9.3 Comparaison entre l'alimentation sinusoïdale et non sinusoïdale à 50Hz .....	48
IV.10 Explication par rapport aux thermocouples .....	50
IV.11 Comparaison entre les valeurs de la température simulée et mesurée .....	50
IV.12 Conclusion .....	52

**Conclusion générale.....**54

### **Annexes**

#### **Références bibliographiques**

Dans le secteur industriel les moteurs asynchrones à cage sont les plus utilisés en raison des critères de robustesse, de moindre entretien, de haut rendement, et au développement des alimentations (convertisseurs statique). En effet, l'utilisation d'alimentations non sinusoïdales et à fréquence variable, les moteurs deviennent très sensibles du point de vue thermique aux fluctuations plus ou moins importantes des pertes. [1]

L'étude du comportement thermique de ce moteur (voire les machines électriques tournantes en général) s'avère de plus en plus nécessaire à cause de leur fonctionnement qui est fortement conditionné par leur environnement extérieur et leur mode de fabrication, c'est une tâche difficile qui est dû aux nombreux facteurs (dimensions, propriétés physiques compliqués,...ext). Cependant, le domaine des variations de vitesses s'est étendu, la conception des nouveaux moteurs de structures adaptées à ces nouvelles performances est encore au stade d'étude ou expérimental. [1]

Le but principal de notre travail est d'étudier le processus d'échauffements et le comportement thermique d'un moteur asynchrone à cage de petite puissance avec le bobinage statorique monté en triangle sous une tension nominale de 380 V avec deux types d'alimentation électrique, une alimentation directe au réseau électrique de 50Hz de fréquence fixe ainsi avec un convertisseur statique (variateur de fréquence). Pour mener cette étude et pour élaborer un modèle thermique d'un moteur asynchrone à cage, l'analyse par la méthode des éléments finis a été adoptée en utilisant le logiciel FEMM, associé à des essais expérimentaux.

Notre travail consiste sur la mesure de la température d'un moteur asynchrone pour les différentes fréquences, réparties en quatre chapitres comme suit :

- Le premier chapitre nous présenterons une synthèse bibliographique sur les différentes pertes dans un moteur asynchrone à cage alimenté par une source sinusoïdale et non sinusoïdale.
- Nous étudierons dans le deuxième chapitre les modes de transferts de la chaleur, méthodes d'études thermique et moyens de mesure de la température dans une machine électrique.
- Le troisième chapitre traite le modèle d'un moteur asynchrone à cage sous différentes sources d'alimentation. Nous utilisons un logiciel bidimensionnel de calcul qui peut être appliqué à l'étude de différents modèles des systèmes.

- Dans le dernier chapitre, on présentera les mesures de température d'un moteur asynchrone sous différentes charges et sources d'alimentation.

Ce travail se termine par une conclusion générale dans laquelle on résume les principaux résultats obtenus et on énumérera les perspectives à ce travail.

## **I.1 Introduction**

Les machines électriques sont des convertisseurs électromécaniques, la transformation d'énergie est valable dans les deux sens, soit en mode génératrice ou en mode moteur, mais le processus de transformation n'est pas parfait, une partie de cette énergie se dissipe sous forme de pertes diverses, c'est pour cette raison que les concepteurs cherchent toujours à optimiser le rendement, pour un gain du coût et de matière.

Les pertes dans les machines électriques et dans le moteur asynchrone en particulier sont de différents types et de différentes causes, aussi elles se différencient avec le type d'alimentation. Dans ce chapitre nous allons énumérer l'ensemble des pertes avec les deux types d'alimentation sinusoïdale et non sinusoïdale.

## **I.2 Les pertes dans le moteur alimenté en tension sinusoïdale**

L'étude des pertes est d'un grand intérêt, car leur détermination et leur quantification permettent d'élaborer des moyens pouvant les réduire, en conséquence augmenter le rendement.[2]

### **I.2.1 Les pertes fer**

Ces pertes regroupent les pertes par hystérésis et les pertes par courant de Foucault, elles sont en fonction du flux magnétique, ce flux dépend de la tension d'alimentation et de la fréquence statorique. Or, ces pertes se trouvent uniquement dans le stator car au niveau de rotor elles sont souvent négligeables en raison de la fréquence rotorique très faible. [3]

#### **➤ Les pertes par courant de Foucault**

Les courants de Foucault sont les courants créés dans les masses conductrices avec l'action de la variation du flux autour de ces masses ou la variation de ces masses dans un champ magnétique, ces courants de Foucault engendrent des pertes dites les pertes par courant de Foucault.

Elles sont estimées par la relation suivante : [3]

$$P_f = K_f \cdot (e \cdot f \cdot B_{\max})^2 \quad (I.1)$$

Avec :

$P_f$  : Les pertes fer massique par courant de Foucault [W/kg].

$K_f$  : Coefficient caractéristique de la tôle.

$e$  : Epaisseur de la tôle [m].

$B_{\max}$  : Induction maximale [T].

$f$  : La fréquence du champ tournant résultant [Hz].

➤ **Les pertes par hystérésis**

Les pertes par hystérésis résultent, sous l'action de la variation d'intensité et de la direction du champ magnétique appliqué, de transformation de la matière en domaines.

Ces transformations irréversible se font avec apparition d'hystérésis et absorbent de l'énergie. La formule qui permettra de les calculer est donnée par : [4]

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{\max}^2 \quad (I.2)$$

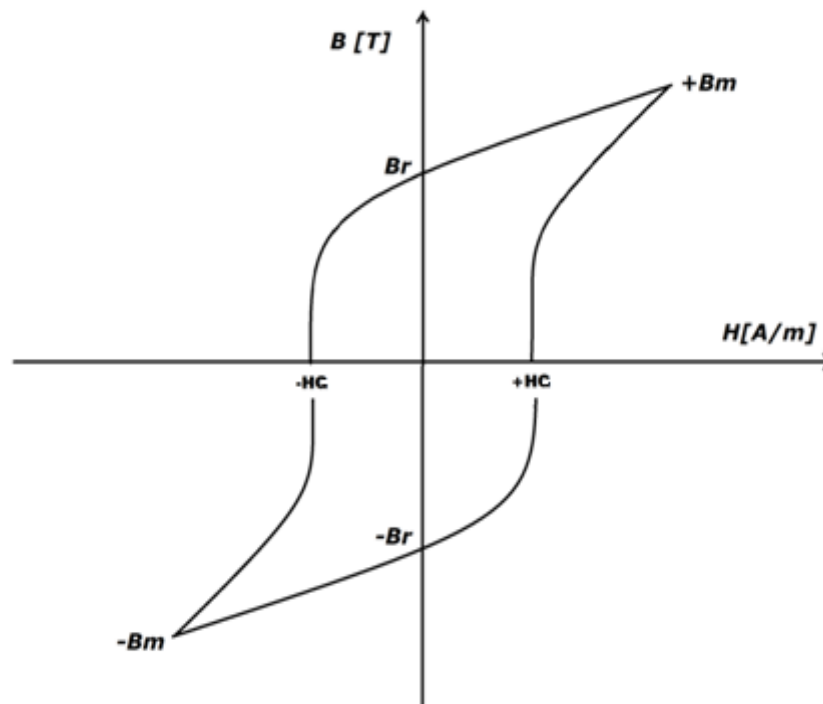
Avec :

$P_h$  : La puissance massique perdue par hystérésis [W/kg].

$K_h$  : Le coefficient des pertes par hystérésis (spécifique du matériau).

$B_{\max}$  : L'induction maximale [T].

$f$  : La fréquence [Hz].



**Fig.I.1** Cycle d'hystérésis d'un matériau magnétique

### **I.2.2 Les pertes mécaniques**

Ce sont les pertes produites lors des frottements dus à la rotation des parties tournantes de la machine : frottement entre solides et frottement entre solide et fluide.

Ces pertes sont de différents types, dont on peut citer : [2][4]

➤ **Les pertes par frottement dans les roulements**

Ces pertes se produisent lors de frottements entre deux corps roulants, au mouvement de fluide et du lubrifiant et des joints associés aux roulements. Ces frottements dépendent de différents facteurs, Comme la charge associée aux roulements, la nature du lubrifiant ...etc.

➤ **Les pertes par ventilations**

Les pertes par ventilations se résultent de la puissance absorbée par le ventilateur monté au bout de l'arbre, il a comme utilité le refroidissement de la machine.

### **I.2.3 Les pertes joules**

Le passage du courant dans un conducteur électrique induit une puissance appelée les pertes joules qui se présentent sous forme de chaleur. Dans le moteur asynchrone à cage d'écureuil, ces pertes sont déterminées séparément pour l'enroulement statorique et pour la cage d'écureuil. La relation  $RI^2$  valable pour les deux enroulements, avec R est la valeur de la résistance, et I le courant absorbé. [5][2]

La valeur des pertes joules se diffère selon les deux montages triangle et étoile d'où :

➤ Pour le montage triangle :

$$P_j = \frac{3}{2} RI^2 \quad (I.3)$$

➤ Pour le montage étoile :

$$P_j = 3RI^2 \quad (I.4)$$

Avec :

$R$  : la résistance d'une phase [ $\Omega$ ].

$I$  : Le courant de ligne [A].

La valeur de R dépend de la température, elle est donnée par cette équation suivante: [5]

$$R = R_0 \frac{k + T}{k + T_0} \quad (I.5)$$

Avec :

$R$  : La résistance d'une phase [ $\Omega$ ].

$R_0$  : Résistance à la température de référence  $T_0$  [ $\Omega$ ].

$T$  : La température de la phase [ $^{\circ}\text{C}$ ].

$K$  : Coefficient de température caractéristique du matériau [ $^{\circ}\text{C}$ ] $^{-1}$ . (234.5 [ $^{\circ}\text{C}$ ] $^{-1}$  Pour le Cuivre, et 225[ $^{\circ}\text{C}$ ] $^{-1}$  pour l'Aluminium)

$T_0$ : Température de référence [ $^{\circ}\text{C}$ ].

#### **I.2.4 Les pertes supplémentaires**

Les pertes supplémentaires regroupent l'ensemble des pertes mise à part celles citées précédemment, elles sont dues aux phénomènes électromagnétiques, notamment celles qui correspondent au flux de fuite. Ces pertes sont présentes dans les conducteurs et dans la tôle par: [5][6]

- Les conducteurs :
  - ✓ Par effet de peau.
  - ✓ Flux de fuite d'encoche et des têtes de bobines.
  - ✓ Inclinaison d'encoches et le contact entre les barres et les tôles.
  
- Les tôles :
  - ✓ Effet pelliculaire aux hautes fréquences.
  - ✓ Par effet d'extrémité due au flux de fuite des têtes de bobines.

La quantification expérimentale de ces pertes en charge s'avère très difficile dans le moteur asynchrone. Elles peuvent être déterminées avec la différence entre les pertes globales en charge de la machine qu'on calcule avec le bilan de puissance et les pertes déterminées par la méthode de séparation des pertes. [5][3]

$$P_{\text{sup}} = P_{\text{tot}} - (P_f + P_{\text{mec}} + P_{\text{js}} + P_{\text{jr}}) \quad (I.6)$$

Avec :

$P_{\text{sup}}$  : Les pertes supplémentaires [W].

$P_{tot}$  : Les pertes totales [W].

$P_{mec}$  : Les pertes mécaniques [W].

$P_{js}$  : Les pertes joules statoriques [W].

$P_{jr}$  : Les pertes joules rotoriques [W].

$P_f$  : Les pertes fer [W].

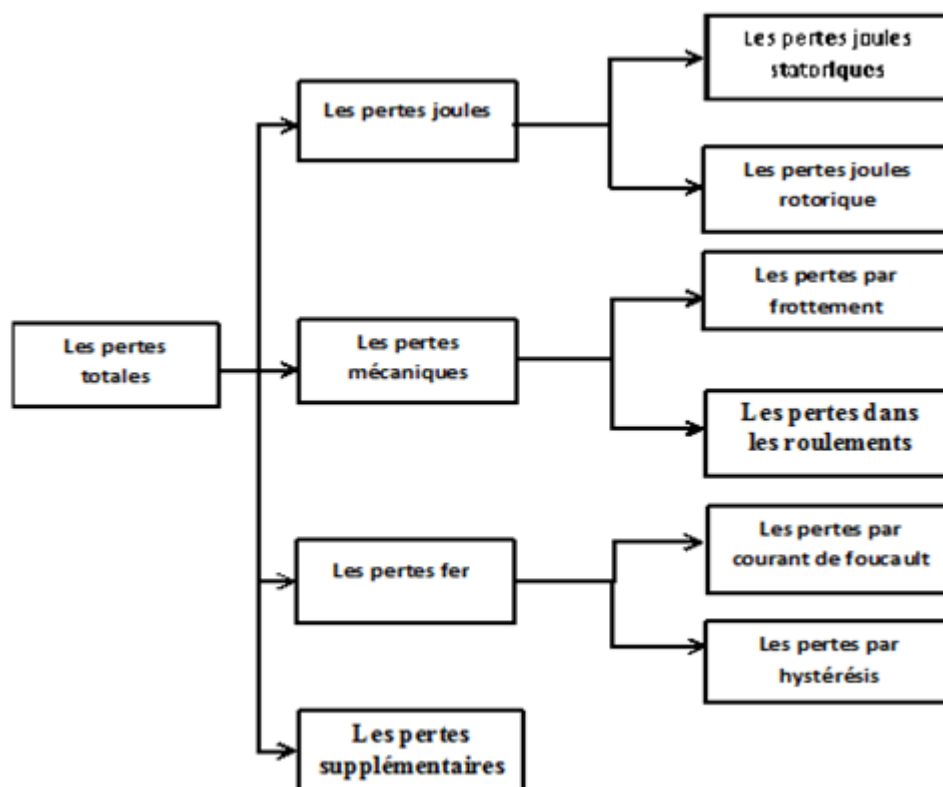


Fig.I.2 Les différents types des pertes dans la machine asynchrone [2]

### I.3 Les pertes dans le moteur alimenté en tension non sinusoïdale

L'association des convertisseurs avec les machines à inductions permet d'avoir une vitesse variable, mais ces convertisseurs produisent des formes d'ondes non sinusoïdales, l'étude de ces ondes s'avère complexe c'est pour ce fait qu'elles doivent être décomposée en série de Fourier pour faciliter l'étude des pertes dans la machine. Aux fréquences harmoniques, la répartition du courant électrique n'est pas uniforme dans les conducteurs, ce qui est dû à l'effet de peau, par ailleurs la résistance augmente ce qui engendre des pertes de cuivres additionnelles.

Dans le but de l'amélioration ou d'amoindrir les pertes causées par les harmoniques, des règles ont été élaborées comme celles de Smolenski, qui sont les suivantes :

- Le nombre d'encoches au rotor doit être inférieur au nombre d'encoches au stator.
- Le choix de nombre d'encoches au stator doit être le maximum que possible.
- Eviter l'inclinaison des encoches surtout dans le cas où le nombre d'encoches au rotor est supérieur à celui de stator.
- Choisir un raccourcissement de  $\frac{5}{6}$  pour l'enroulement statorique.
- Dans le cas d'un enroulement statorique à connexion triangle, prendre le nombre d'encoches au rotor différent de  $2p$ ,  $4p$  et  $8p$ ,  $p$  étant le nombre de paires de pôles.
- Le rapport d'ouverture d'encoches 'b' à hauteur 'h' doit satisfaire les conditions suivantes :

- ✓ Pour le stator  $\frac{b_1}{h_1} \leq 3$ .

- ✓ Pour le rotor  $\frac{b_2}{h_2} \leq 1$ .

- Les ouvertures d'encoches statoriques doivent être aussi petites que possibles. [5]

#### **I.4 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur les pertes diverses produites dans les machines asynchrones avec les deux alimentations sinusoïdale et non sinusoïdale, de même les méthodes permettant de les calculer aussi les moyens pouvant réduire les pertes supplémentaires pour ce type de machine.

## **II.1 Introduction**

Les pertes dans les machines électriques se traduisent par une élévation de température, pourtant la machine tend toujours à l'équilibre calorifique. Pour ce faire la chaleur est évacuée par les éléments constituant la machine vers le milieu ambiant. Le transfert de chaleur au sein de la machine se produit sous trois modes soit par conduction ou convection ou bien par rayonnement tout dépend de la nature de contact et du type de matériau. Plusieurs moyens ont été établis dans le but de la mesure de température soit par contact direct (thermocouple et thermistance) ou par contact indirect (caméra thermique).

## **II.2 Les modes de transfert de chaleur**

### **II.2.1 Le transfert de chaleur par conduction**

Le processus de chaleur par conduction est provoqué par une différence de température entre deux régions de même milieu ou de différents milieux en contact physique. Ce processus de conduction résulte d'un transfert de chaleur des parties les plus chaudes d'un corps vers les parties les plus froides. La chaleur se propage suivant des lignes de flux orthogonales à des surfaces isothermes. Ce transfert est caractérisé par la relation de Fourier qui stipule que la densité de flux thermique est proportionnelle à l'opposé du gradient de la température  $T$  suivant la normale aux surfaces isothermes. [7][8]

#### **II.2.1.1 La relation de fourier**

Comme le mode de transfert par conduction s'effectue dans les milieux solides en contact, lorsque ces derniers sont soumis à une différence de température ( $T_1 - T_2$ ), la densité de flux de chaleur s'exprime par :

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

Dans un milieu homogène la densité de flux de chaleur s'écrit :

$$\varphi = \frac{-\lambda}{L} \cdot (T_i - T_j) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

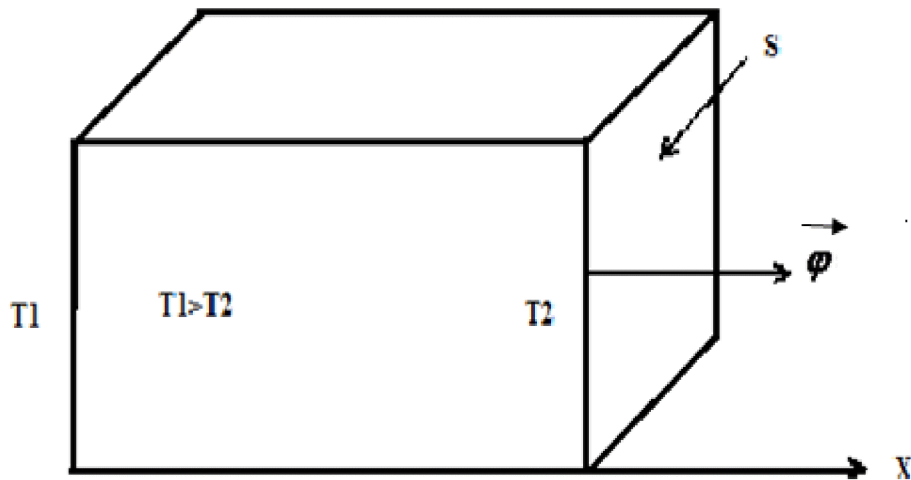
$\varphi$  : Densité de flux thermique ( $\text{W/m}^2$ ).

$\lambda$  : La conductivité thermique ( $\text{W/m.C}$ ).

$T$  : La température ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$L$  : La distance entre le point  $i$  et  $j$  (m).

$\vec{grad}T$  : C'est le gradient de température, c'est-à-dire la variation de la température selon la direction  $\frac{dT}{dn}$ . [9][10][11]



*Fig.II.1 Schéma de transfert de chaleur conductif dans un solide [4]*

### II.2.1.2 La conductivité thermique

La conductivité thermique notée  $\lambda$  est une grandeur physique qui caractérise l'aptitude du matériau à conduire la chaleur lors du processus de transfert de chaleur. La conductivité est exprimée généralement par un tenseur à trois composantes, c'est le cas des matériaux anisotrope comme les empilages des tôles. En se basant sur la loi de Fourier, on peut tirer la loi qui définit la conductivité thermique. [12][13][11]

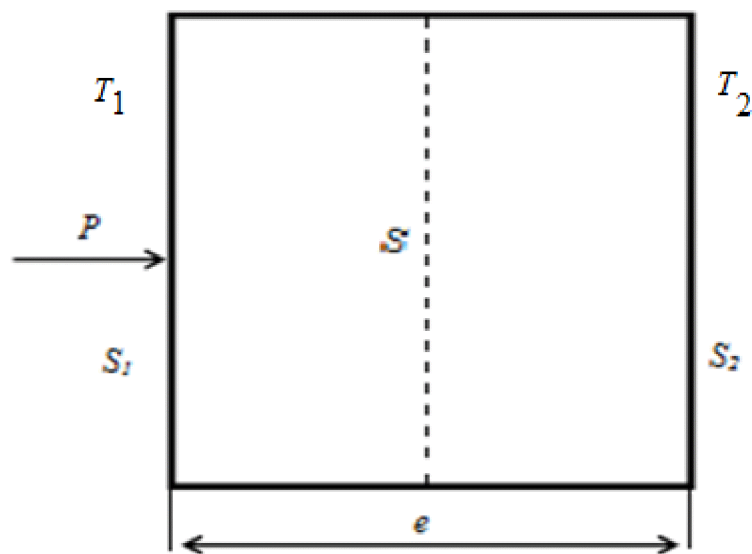
$$\lambda = - \frac{\vec{\varphi}}{\vec{grad}T} \quad (II.3)$$

D'après la loi (II.3) et d'un point de vue numérique la conductivité thermique représente l'énergie transférée en unité de surface isotherme et de temps sous un gradient de température.

### II.2.1.3 La conductivité thermique des solides hétérogènes

Dans le cas des solides purs, on peut aisément tirer la valeur de la conductivité thermique. Par contre dans le cas des matériaux solides composés hétérogènes très courants en construction électriques, dans ce cas il est envisageable de définir une conductivité thermique équivalente de l'ensemble. Pour ce faire on procède avec la notion des résistances thermiques équivalentes qui est analogue en électrocinétique à la résistance électrique. Pour élucider cela, nous considérons un matériau de conductivité  $\lambda$  d'épaisseur  $e$  et de la section  $S$  dans la direction de la conduction les

faces externes sont respectivement aux températures  $T_1$ ,  $T_2$  sur les surfaces  $S_1$  et  $S_2$  (Figure II.2). [12][14]



FigII.2 Elément simple d'un circuit thermique [4]

Sachant que la surface ( $S_1$ ) reçoit une puissance  $P$  en Watts, la loi de Fourier associée à cet élément problème est la suivante : [10][12]

$$\frac{P}{S} = \lambda \frac{(T_i - T_j)}{e} \quad (\text{II.4})$$

$$P = \frac{\lambda S}{e} (T_i - T_j) \quad (\text{II.5})$$

En la mettant sous la forme suivante et par analogie à la loi d'Ohm en électrocinétique on déduit l'expression de la résistance thermique :

$$(T_i - T_j) = \frac{\lambda S}{e} \cdot P \quad (\text{II.6})$$

$$R = \frac{e}{\lambda S} \quad (\text{II.7})$$

Nous pouvons généraliser cette expression pour les différentes géométries en considérant une section moyenne  $S_{\text{moy}}$ , dans ce cas la relation (II.7) s'écrit de cette façon :

$$R = \frac{e}{\lambda \cdot S_{moy}} \quad (II.8)$$

La relation (II.8) diffère d'une structure géométrique à une autre :

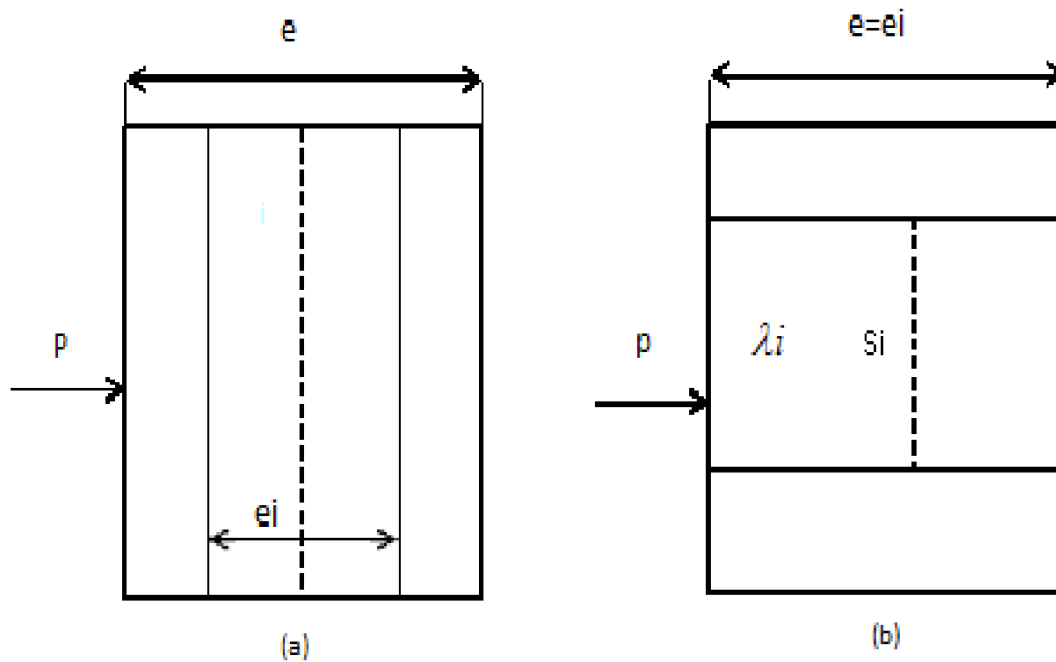
- Le cas d'un cylindre :

$$S_{moy} = \frac{S_1 \cdot S_2}{\log\left(\frac{S_2}{S_1}\right)} . \text{ Est la moyenne logarithmique des surfaces } S_1 \text{ et } S_2 \text{ des faces internes et externes.}$$

- Dans le cas d'une sphère :

$$S_{moy} = \sqrt{S_1 \cdot S_2} . \text{ Est la moyenne géométrique des surfaces internes et externes. [15]}$$

Si nous avons à faire à un système composé de multiples couches ( $i$ ) des milieux différents, le système peut être représenté par la Figure II.3 :



**Fig.II.3** Conduction à travers un élément composé [4]

(a) en série, (b) en parallèle

La Figure II.3 montre deux associations de la résistance thermique:

- Association série.
- Association parallèle.

Dans la Figure II.3.a, la résistance thermique équivalente est l'association en série des résistances de chaque couche :

$$\frac{1}{\lambda_{eq}} \cdot \frac{e}{S} = \sum_i \frac{e_i}{S_i \cdot \lambda_i} \quad (\text{II.9})$$

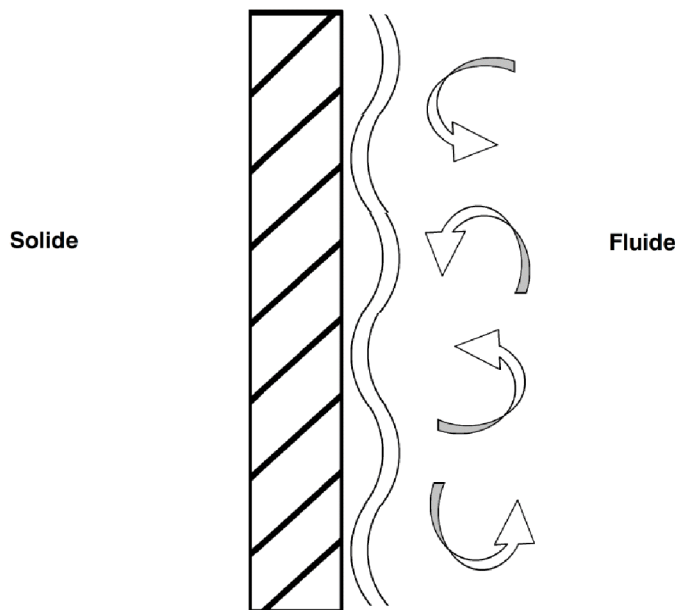
Dans la Figure II.3.b, la résistance thermique équivalente est l'association en parallèle des résistances de chaque couche :

$$\lambda_{eq} \cdot \frac{S}{e} = \sum_i \lambda_i \cdot \frac{S_i}{e_i} \quad (\text{II.10})$$

Pour ses géométries différentes, S est remplacée par  $S_{moy}$ . [4]

### II.2.2 Le transfert de chaleur par convection

Le transfert de chaleur par convection résulte lors de contact entre un milieu solide et un fluide, liquide ou gaz. Ce transfert est déterminé par le déplacement de particules élémentaires d'un fluide. Pour illustrer prenant une paroi formée de plusieurs couches, ces dernières cèdent leur chaleur par conduction au fluide adjacent qui la transmet dans une direction perpendiculaire à la paroi toujours par conduction et le mouvement du fluide permet à l'énergie de s'accumulée et de s'écouler vers les régions les plus froides. [13][12]



*Fig.II.4 Schéma de transfert thermique convectif [3]*

Le transfert de chaleur par convection se fait sous deux formes, forcée et naturelle (libre).

- La convection naturelle ou libre, le déplacement des fluides en contact avec la paroi induit des échanges thermiques qui apparaissent naturellement en raison de gradient de température entre les surfaces ou au sein de fluide lui-même.
- La convection forcée se produit quand le mouvement est imposé au fluide.

Le phénomène global de la convection, peut s'exprimer sous la forme d'équation appelée loi de Newton qui est la suivante: **[3][14]**

$$\varphi = h(T_s - T_f) \quad (\text{II.11})$$

Avec :

$h$  : coefficient de transfert thermique [ $\text{w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ].

$T_f$  : Température de l'entourage (fluide) [ $^\circ\text{C}$ ].

$T_s$  : Température de la surface du corps [ $^\circ\text{C}$ ].

Le calcul du coefficient  $h$  qui dépend de la nature de la surface d'échange, de la nature de fluide et du mouvement relatif au fluide par rapport au solide s'avère très complexe, c'est pour cette raison que le calcul du le transfert de chaleur par convection est d'une grande difficulté.

### **II.2.3 Le transfert de chaleur par rayonnement**

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces qui ne sont pas en contact direct, c'est le mode de transmission par lequel la chaleur passe d'un corps à haute température à un autre plus froid et qui ne se touchent pas et qui sont séparés par un milieu transparent tel l'air, ou le vide.

Ce mode de transfert de chaleur est basé sur la propagation d'ondes électromagnétique.

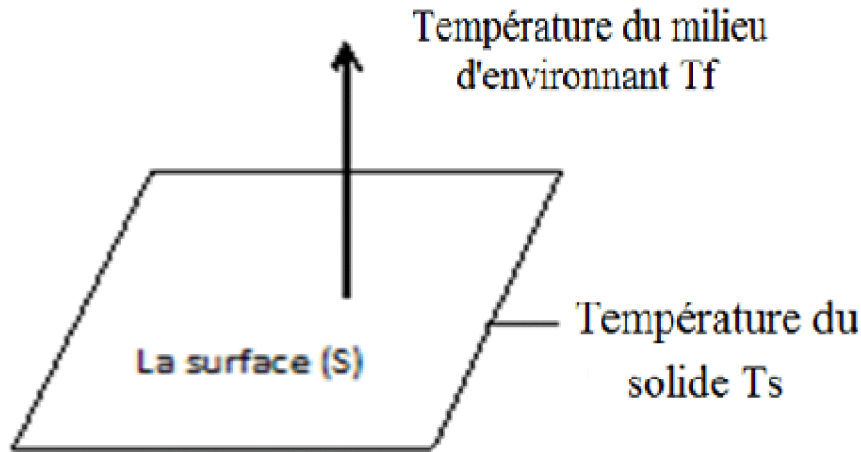


Fig.II.5 Schéma de transfert de chaleur radiatif [11]

Le transfert d'énergie par rayonnement est régi par la loi de Stefan-Boltzmann, le flux de chaleur résultant entre deux corps de température  $T_s$  et  $T_f$  s'écrit sous la forme suivante :

$$\Phi = \epsilon_p \cdot \sigma \cdot S (T_s^4 - T_f^4) \quad (\text{II.12})$$

Avec :

$\Phi$ : Le flux de chaleur transmis par rayonnement (W).

$\epsilon_p$  : Facteur d'émission de la surface.

$\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ).

$T_s$  : Température de la surface (°K).

$T_f$  : Température du milieu environnant à la surface (°K).

$S$  : Aire de la surface [ $\text{m}^2$ ]. [7]

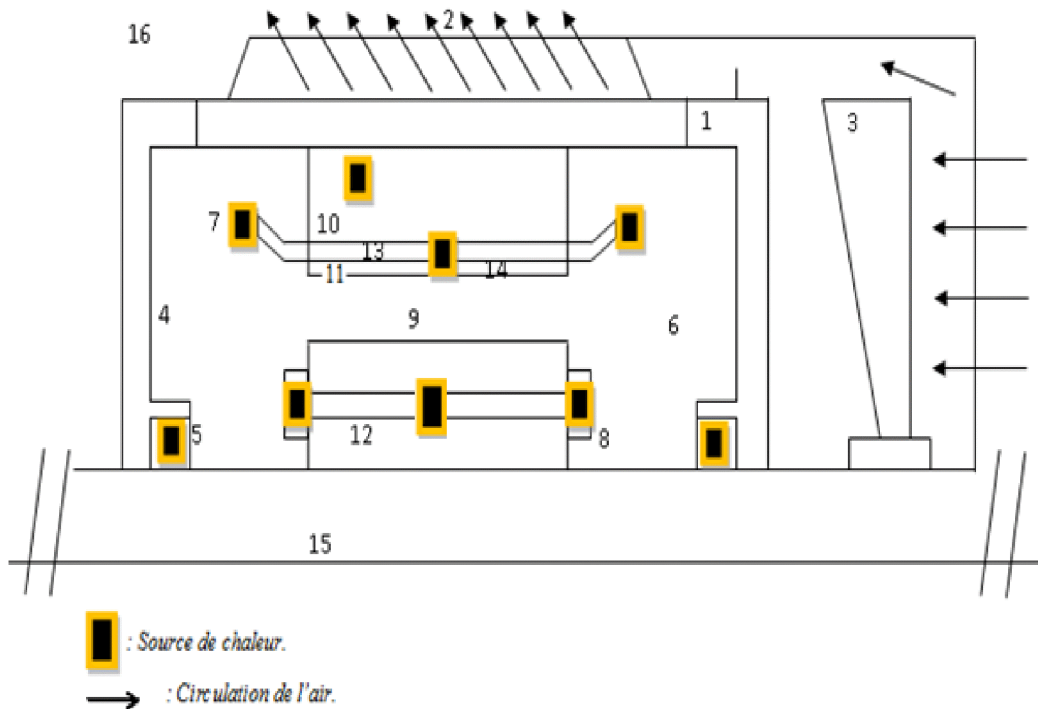
### II.3 Application à la machine étudiée

Dans notre cas d'étude, la machine utilisée est une machine asynchrone à cage d'écureuil fermée sur elle-même et auto-ventilé.

La Figure II.6 montre une section transversale d'une machine asynchrone à cage avec les différentes sources de chaleur, le ventilateur monté sur le bout de l'arbre suit le mouvement du rotor. Il débite un flux d'air sur la surface extérieure de la carcasse. Cette dernière est augmentée par des ailettes qui accroissent le transfert de chaleur.

Comme le montre la figure II.7, dans les parties solides de la machine, le transfert de chaleur se produit par conduction. Dans l'entrefer l'air circule d'une façon radiale, ce qui fait que l'évacuation de chaleur du rotor vers le stator à travers l'entrefer se fait aussi radialement par conduction et convection.

Le rotor qui tourne dans l'air interne sert d'intermédiaire pour le transfert de chaleur axiale entre les différentes parties (anneaux de court-circuit, tête de bobine, circuit magnétique), la chaleur est véhiculée depuis les extrémités de ces parties vers le flasque par convection.

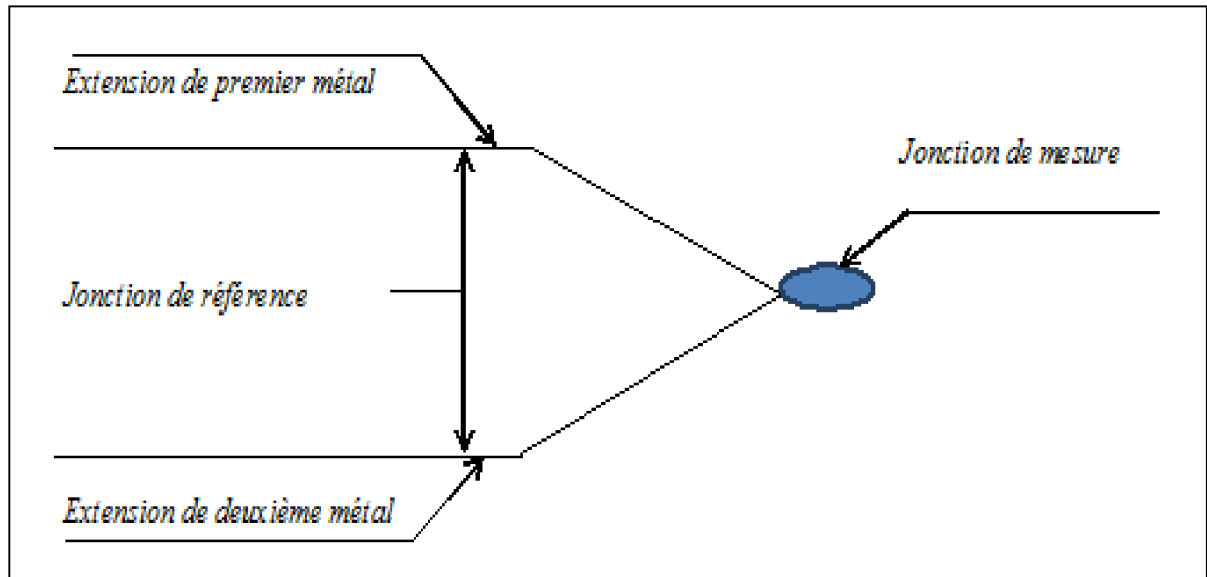


**Fig.II.6 Sources de chaleur dans une machine électrique [5]**

- |                  |                                |                          |
|------------------|--------------------------------|--------------------------|
| 1 : Carcasse.    | 6 : Air emprisonné.            | 11 : encoche rotorique.  |
| 2 : Ailette.     | 7 : Tête de bobine statorique. | 12 : Fer rotorique.      |
| 3 : Ventilateur. | 8 : Anneau de court-circuit.   | 13 : Encoche statorique. |
| 4 : Flasque.     | 9 : Entrefer.                  | 14 : La dent statorique. |
| 5 : Roulement.   | 10 : Fer statorique.           | 15 : Arbre.              |
|                  |                                | 16 : Air ambiant.        |



gradient de température produit une force électromotrice aux bornes du circuit. Pour obtenir une température en degrés Celsius, il est nécessaire d'avoir une autre jonction de référence (dite jonction ou soudure froide). Cette jonction est généralement intégrée dans l'électronique sous le nom de "compensation de soudure froide" (CSF) ou matérialisée par un bain de glace fondante dans lequel est plongée la jonction de référence. [13][14]



*Fig.II.8 Principe d'une réalisation d'un thermocouple [3]*

#### II.4.1.2 Avantage et inconvénient de thermocouple

- **Avantage :**

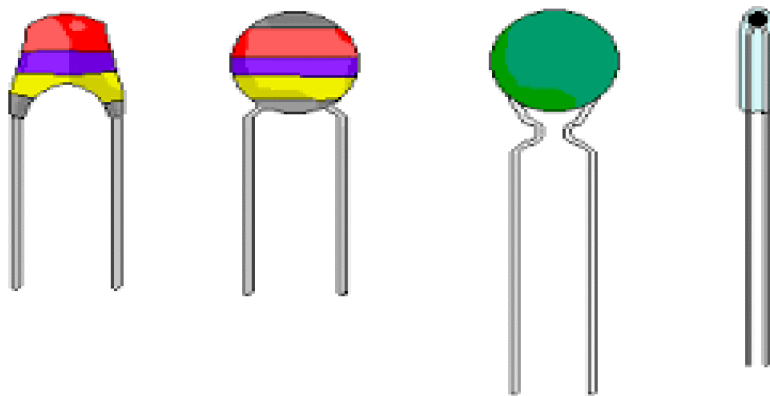
- Robustesse.
- Un temps de réponse court.
- La gamme de température très large.
- Ne nécessite pas une alimentation.

- **Inconvénient :**

- La température de référence doit être connue.
- Défaut d'isolement au-delà de 1800 K.
- Le non linéarité.
- La difficulté de l'étalonnage.
- L'impact de l'environnement. [13]

### II.4.1.3 Les thermistances

Les thermistances (Figure II.9) sont des conducteurs thermosensibles donc à résistance variable avec la température. Les thermistances sont constituées d'un matériau semi-conducteur d'oxyde métallique en capsulé dans une petite bille d'époxy ou de verre. Les thermistances sont dotées soit d'un coefficient de température positif (CTP) ou bien d'un coefficient de température négatif (CTN). Dans le cas de (CTP), la résistance associée à la thermistance accrue lorsque la température augmente, tandis que dans le (CTN), la résistance diminue lorsque la température augmente. Dans les deux cas, la résistance varie d'une manière exponentielle avec la variation de la température. [13][3]



*Fig.II.9 Différents types des thermistances*

### II.4.1.4 Avantage et inconvénient de la thermistance

- **Avantage**
  - Un temps de réponse court.
  - La précision.
- **Inconvénient**
  - La gamme de température est limitée (pas plus de 300k).
  - Nécessite une alimentation. [13]

### II.4.2 La méthode de mesure sans contact

Cette méthode consiste à transmettre l'information de la variation de température sans qu'il y'ai contact direct entre l'élément sensible et le capteur. L'outil permettant de réaliser cette méthode de mesure est appelé caméra thermique (Figure II.10). Elle permet de localiser les défauts qui n'auraient pas été testés lors d'un contrôle traditionnel. [3]



*Fig.II.10 La caméra thermique*

#### **II.4.2.1 Principe de fonctionnement de la caméra thermique**

Tout corps possédant une température émet un rayonnement électromagnétique (la lumière), c'est avec ce principe que la caméra thermique fonctionne, elle analyse le rayonnement émis par le corps et en contrepartie elle détermine sa température. Cette dernière est liée à la longueur d'onde ou couleur de rayonnement. Pour les températures autour de 20-30°C la longueur d'onde est de l'ordre de plusieurs micromètres, et de l'ordre de centaines de nanomètres pour les températures élevées.

Dans ce type de mesure le corps joue le rôle de l'élément sensible. [3]

#### **II.4.2.2 Avantages et inconvénients de la caméra thermique**

- **Avantage**

- possibilité d'effectuer des mesures des corps en mouvement (sous tension).
- Le temps de réponse très minime, de l'ordre des millisecondes.
- Distance de mesure importante.
- Durée de vie élevée.
- les capteurs offrent les possibilités à l'intégration avec les outils informatiques.

- **Inconvénients**

- La caméra thermique indique seulement la température surfacique.
- Elle nécessite une alimentation. [3]

#### **II.5 Les méthodes d'étude thermique**

L'étude thermique d'une machine électrique permet de prédéterminer son comportement thermique correspondant à la répartition des pertes au sein de la machine, dans ces études deux méthodes sont exploitables, les méthodes théorique et les méthodes expérimentales, ces deux

dernières sont indispensables et indissociables vu que les tests expérimentaux permettent de valider les modèles théorique. [15][10]

## **II.5.1 Les méthodes théoriques**

### **II.5.1.1 Les méthodes nodales**

C'est des méthodes anciennes, qui sont moins utilisables avec l'avènement d'autres méthodes performantes, elles permettent de traiter les problèmes 1D, 2D et 3D, et les équations utilisées ne sont pas forcément linéaires. Le principe d'utilisation de ce modèle consiste à définir des régions communes (dans les milieux solides et fluides) possédant une température uniforme, la description des étapes nécessaire de réalisation de cette méthode est la suivante :

- Découpage de la machine en blocs élémentaires.
- Identifier la nature de transfert de chaleur (convection ou conduction) associé aux blocs élémentaires.
- Etablissement du bilan de flux de chaleur et les conditions aux limites pour chaque bloc.
- Détermination des différents coefficients apparaissant dans les relations. [5][10]

### **II.5.1.2 La méthode des éléments finis**

La méthode des éléments finis est conçue pour résoudre les équations aux dérivées partielles, elle est basée sur le passage de milieu continue à sa représentation discrétisée, autrement dit cela revient à découper la représentation globale de domaine en un ensemble de sous-ensembles appelées éléments finis. La précision de cette méthode est conditionnée par la connaissance précise des informations qui caractérisent le matériau, des données d'entrées (sources de chaleurs) et la connaissance de la géométrie et les simplifications apportées au modèle. Au court de ces dernières années plusieurs logiciels ont été élaborés dans le but de l'analyse numérique par méthode des éléments finis. Ces logiciels sont de plus en plus performants et précis et ils offrent la facilité à l'utilisateur. Mais d'autre part leurs prix sont exagérés, parmi ces logiciels on peut citer :

- JMAG : développé par « The japan Research Institue, ltd »
- Maxwell 2D et 3D : Développé par « Ansoft Corporation ».
- MagNet6 : Développé par « Infolytica Corporation ».
- Flux 2D et 3D : développé par « MagSoft ». [9][10]
- Femm : Logiciels gratuit Développé par « David Meeker ».

### **II.5.2 Les méthodes expérimentales**

Les méthodes expérimentales de mesure de température nécessitent des moyens de mesure de température et un lien matériel (les thermocouples, les thermistances et la caméra thermique). Mais parfois elles sont d'une complexité énorme en raison de non accessibilité à certains endroits.

Les méthodes expérimentales s'avèrent très importantes, elles sont carrément indissociable des méthodes théoriques, car elles permettent la validation des résultats obtenues déjà préalablement dans la théorie.

### **II.6 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté le méthodes d'étude thermique d'une machine asynchrone en citant les différents modes de transfert de chaleur associer à chaque partie de la machine, tout en donnant les lois générales qui régissent chacun de ces modes, Nous avons aussi présenté les moyens de mesure de température avec ces deux méthodes (en contact et sans contact), et les différentes méthodes de la modélisation thermique.

### **III.1 Introduction**

Le développement des logiciels informatiques a permis de concevoir des modèles préalables des machines électriques ainsi prévoir leur comportement, avant de passer à la réalisation de ces dernières.

La modélisation thermique des machines électriques peut se réaliser sous le logiciel FEMM grâce à la méthode des éléments finis qui permet de tenir compte de la géométrie de la machine et du couplage entre les grandeurs électriques et thermiques afin d'avoir une approche systématique des problèmes thermiques.

Dans ce chapitre, nous allons présenter la méthode des éléments finis et son application à la modélisation d'un moteur asynchrone à cage en utilisant le logiciel FEMM.

### **III.2 Présentations du logiciel FEMM**

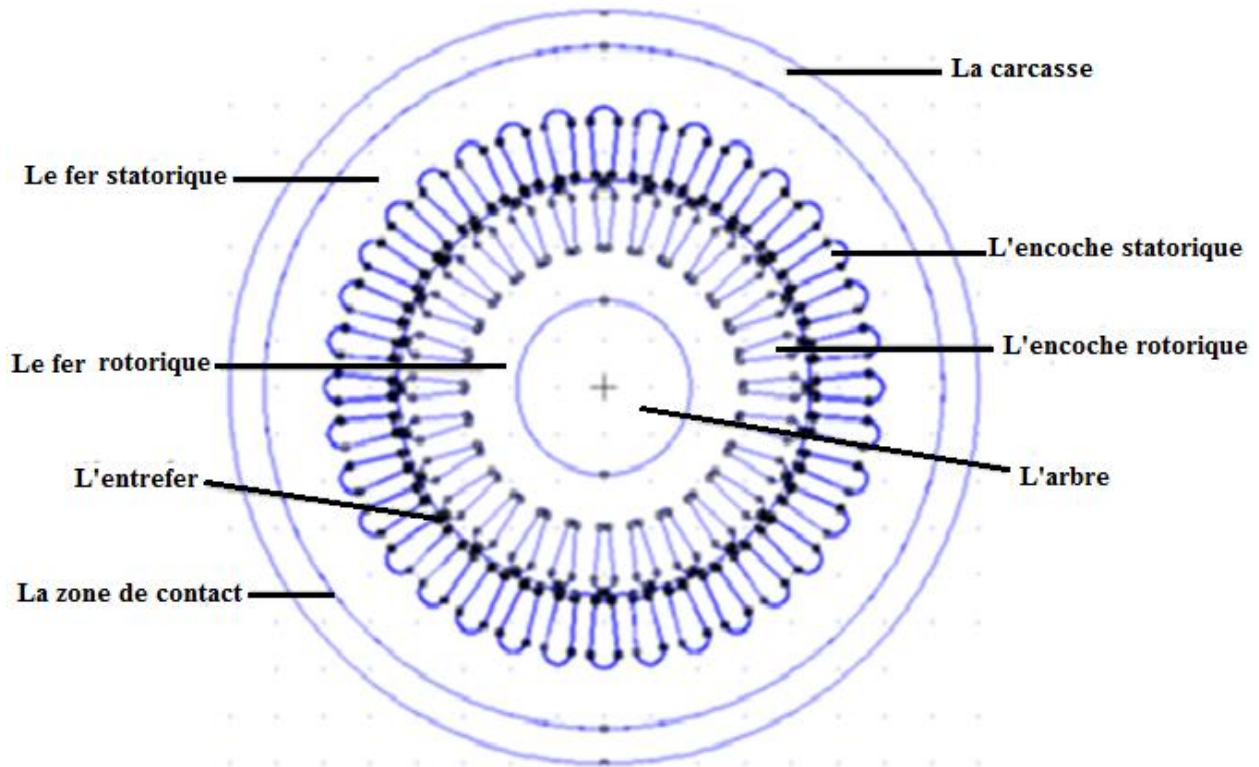
Le logiciel FEMM (Finite Element Method magnetics) est un logiciel développé par David Meeker comportant une série de programmes pour résoudre les problèmes électromagnétiques, électrostatiques et thermiques à basse fréquence dans des domaines plans et axisymétriques bidimensionnels. [15]

FEMM se compose de trois parties essentielles qui sont:

- **Femm.exe** : qui est un poste préprocesseur contenant une interface graphique qui permet de tracer la géométrie de l'objet voulu ; ces propriétés matérielles ainsi que les conditions aux limites. Après l'analyse du phénomène, le résultat sera affiché sous forme d'un contour et des parcelles de densité, il permet également d'évaluer un certain nombre d'intégrales et de tracer des diverses quantités d'intérêt le long du contour défini par l'utilisateur. [15]
- **Triangle.exe** : C'est un programme chargé de décomposition des régions étudiées en un nombre fini d'éléments sous forme triangulaire. [15]
- **Solveurs** : Les solveurs se différencient d'un système à un autre, *fkern.exe* pour le magnétisme, *belasolv* pour l'électrostatique, *hsolv* pour les problèmes de flux de chaleur, et *csolv* pour les problèmes de flux de courant. Chaque solveur prend un ensemble de fichiers de données qui décrivent le problème posé et résout les équations différentielles partielles pertinentes associées à ce problème. [15]

### III.3 La structure du modèle étudié et les hypothèses de travail

Comme Femm est un logiciel qui traite les problèmes 2D donc on va étudier le problème posé en 2D sous une coupe radiale, la structure est représentée dans la Figure III.1 :



*Fig.III.1 La structure du modèle réalisé de la machine étudiée sur Femm*

### III.4 Hypothèses de travail

La modélisation thermique des machines électriques est moins nombreuse, qui est dû à la complexité des phénomènes physiques mises en jeu et de la complexité de la machine. Dans notre cas on travaille avec les hypothèses suivantes: [3]

- Nous considérons les propriétés thermodynamiques des matériaux utilisés isotropes et indépendantes de la température.
- Dans l'entrefer nous supposons que le transfert de chaleur est de type conductif, cela revient à l'absence de la circulation axiale de l'air et d'autre part à la faible épaisseur de l'entrefer.
- Les pertes fer rotoriques sont négligées en raison de circuit magnétique qui est feuilleté, et de la fréquence faible des courants rotoriques.

## **Chapitre III : Etude du modèle thermique d'un moteur asynchrone à cage par la méthode des éléments finis (Femm) sous différentes sources d'alimentation.**

### **III.5 Evaluation des paramètres thermo-physiques**

Le calcul de température de la structure voulue nécessite une connaissance préalable des paramètres thermo-physique des matériaux, voir la conductivité thermique qui est connue préalablement et la densité de perte.

#### **III.5.1 La conductivité thermique**

Les valeurs des conductivités thermiques des différentes zones de la machine sont regroupées dans le tableau (III.1) ci-dessous : [2]

*Tab.III.1 Conductivité thermique des différentes zones de modèle étudié*

<b>Régions</b>	<b>Conductivité thermiques [W/m°C]</b>
Arbre (Acier)	45
Fer statorique et rotorique	50
Encoche rotorique et carcasse (Aluminium)	204
Enroulements statoriques	0.75
Entrefer	0.03
Contact fer statorique-carcasse	0.056

Il est difficile d'évaluer les conductivités thermiques dans certain endroit (enroulement, entrefer,...est).

La résistance thermique de contact entre le fer statorique et la carcasse est fait pour une épaisseur de 0.4 millimètre.

Comme le contact est bon entre les barres de la cage et le rotor, on ne va pas prendre en considération la résistance de contact entre eux.

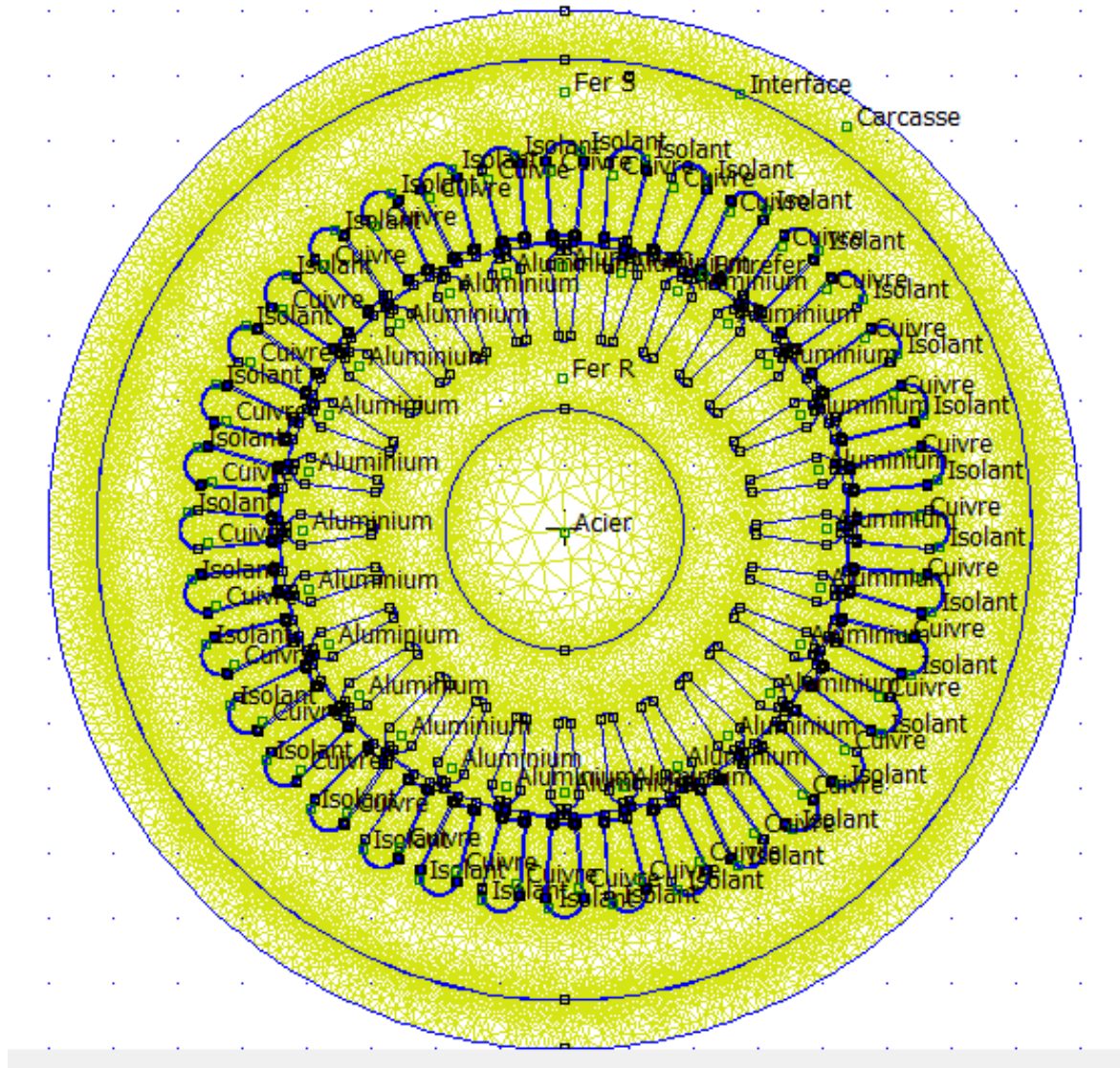
#### **III.5.2 Les densités de pertes**

La détermination des densités de pertes dans les différentes zone de la machine nécessité le dimensionnement des différentes parties pour calculer le volume, Dans notre cas les dimensions géométriques sont connues, aussi calculer les différentes pertes générées.

### II.5.3 Le maillage

Le maillage s'effectue automatiquement sur le logiciel Femm, il consiste à subdiviser la structure en des petits triangles, la structure maillée est représentée dans Figure III.2.

Le maillage est plus fin dans l'entrefer et interface où les paramètres thermique sont difficiles a identifiés. Les conditions aux limites sont de type Dirichlet sur la surface extérieure de la carcasse.



*Fig.II.2 Structure maillée du modèle étudié*

### III.6 Résultats de la simulation

#### III.6.1 Essai à vide avec une alimentation sinusoïdale à 50Hz

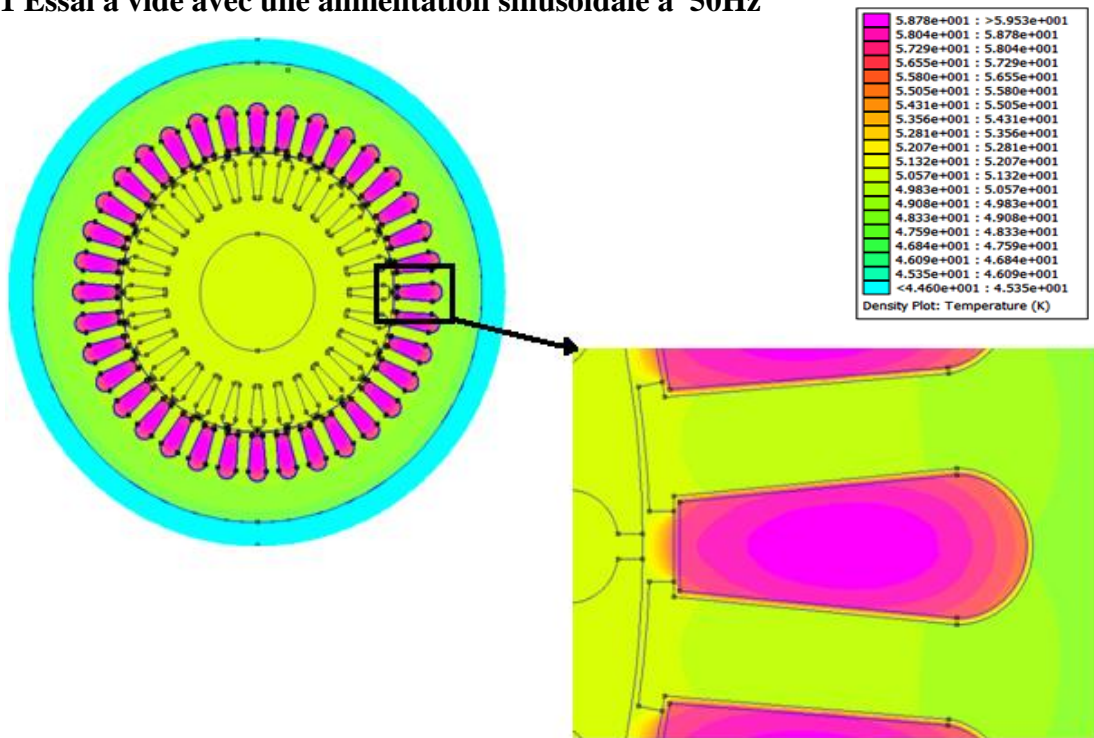


Fig.III.3 Répartition de la température dans l'essai à vide avec une alimentation sinusoïdale à 50Hz

#### III.6.2 Essai à vide avec une alimentation non sinusoïdale à 50 Hz

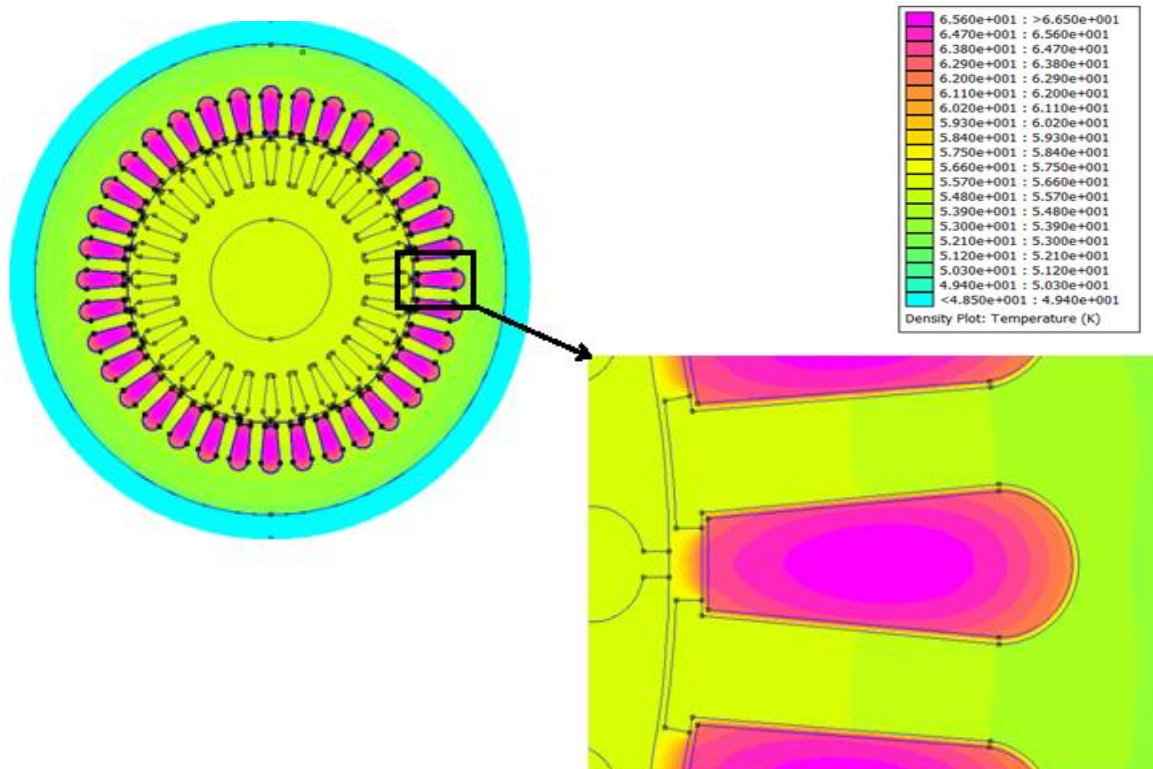
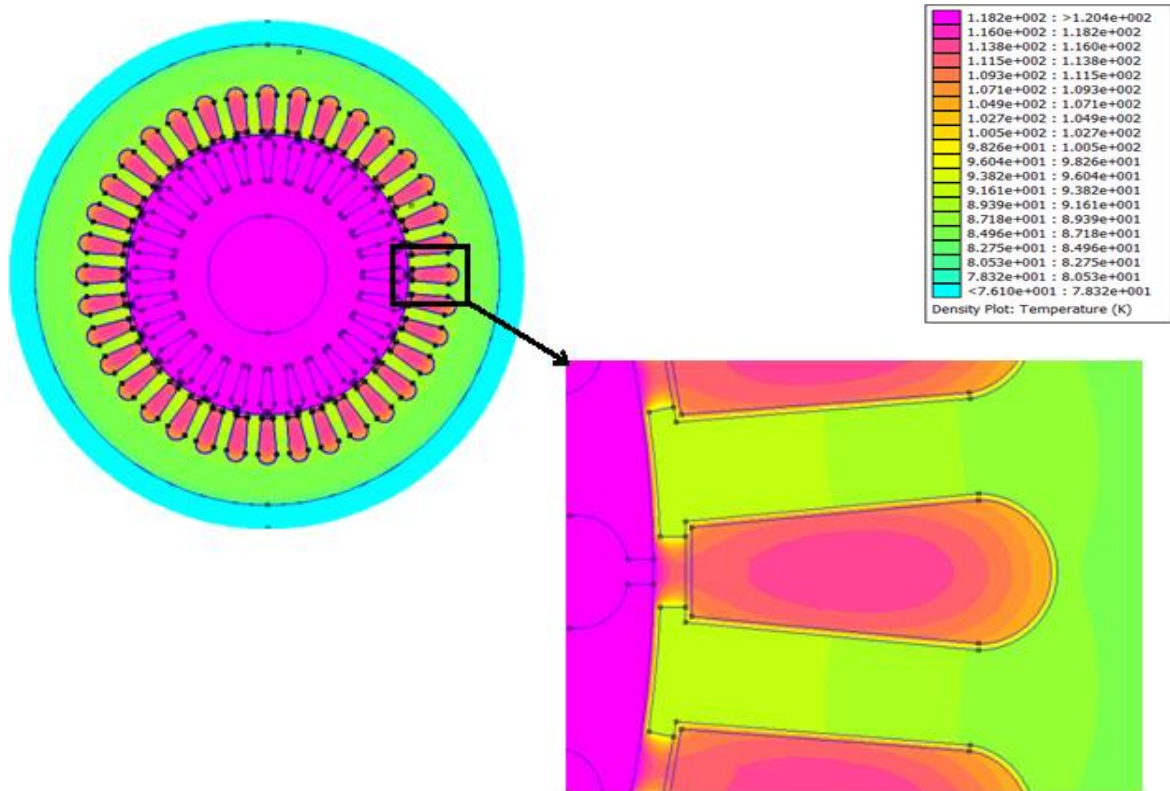


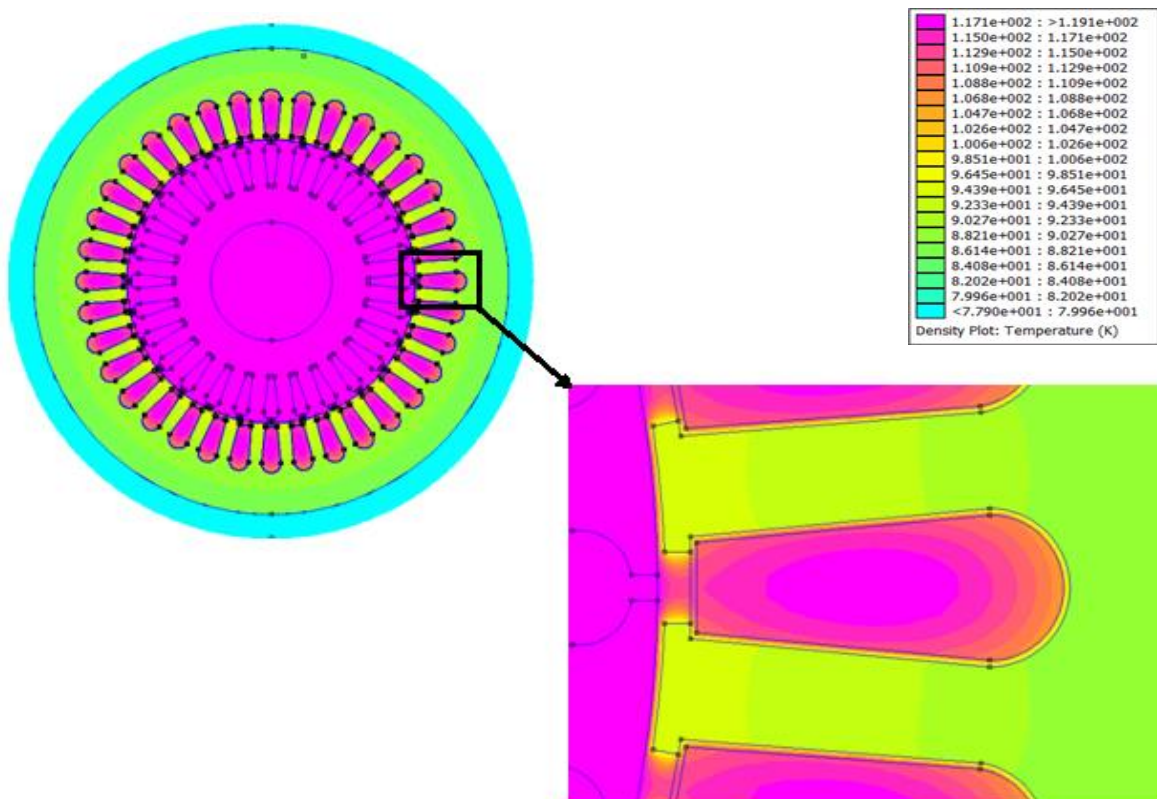
Fig.III.4 La répartition de la température dans l'essai à vide avec une alimentation non sinusoïdale à 50Hz

**III.6.3 Essai en charge avec une alimentation sinusoïdale à 50 Hz**



*Fig.III.5 Répartition de la température dans l'essai en charge avec une alimentation sinusoïdale à 50Hz*

**III.6.4 Essai en charge avec une alimentation non sinusoïdale à 50 Hz :**



*Fig.III.6 Répartition de la température dans l'essai en charge avec une alimentation non sinusoïdale à 50Hz*

## **Chapitre III : Etude du modèle thermique d'un moteur asynchrone à cage par la méthode des éléments finis (Femm) sous différentes sources d'alimentation.**

### **III.7 Interprétation des résultats**

Les résultats obtenus dans les Figures (III.6, III.5, III.4 et III.3) montrent la répartition de la température dans la machine faisant l'objet d'étude, Les valeurs des températures diffèrent d'une zone à une autre, elles dépendent de la densité des pertes et de la conductivité thermique des matériaux.

Le tableau suivant (Tableau III.2) montre les différentes valeurs de la température, pour les cas de fonctionnements sélectionnés.

*Tab.III.2 Valeurs de la température dans les différentes parties de la machine*

<b>Zones</b>	<b>Température °C</b>			
	<b>à vide sin à 50Hz</b>	<b>à vide non sin à 50HZ</b>	<b>en charge sin à 50Hz</b>	<b>en charge non sin à 50Hz</b>
<b>Type d'alimentation</b>				
<b>Rotor</b>	51.49	56.44	120.40	118.65
<b>Culasse statorique</b>	49.32	53.53	85.92	88.26
<b>Dent statorique</b>	56.38	62.54	92.32	93.49
<b>Interface</b>	48.02	52.69	80.64	82.25
<b>Carcasse</b>	44.69	48.6	76.29	78.19
<b>Entrefer</b>	51.45	58.71	108.36	109
<b>Encoche statorique</b>	59.20	66.38	115.90	118

Au stator les enroulements présentent la température la plus haute par rapport à la culasse statorique, cela est dû à l'isolant qui réduit le transfert de chaleur.

Le rotor présente une température importante ce qui est dû à la bonne conductivité thermique de l'Aluminium d'une part. D'autre part le rotor est presque entouré d'air, ce qui ralentit considérablement le transfert de chaleur vers l'ambiant, on remarque aussi dans cette zone une élévation considérable de la température dans l'essai en charge par rapport à l'essai à vide, ce qui est dû au mouvement du rotor dans l'essai en charge, ce qui traduit la présence de densité de pertes dans l'Aluminium dans ce modèle.

La différence de température entre le fer statorique et la carcasse est due à la mauvaise conductivité thermique de la zone de contact.

### **Chapitre III : Etude du modèle thermique d'un moteur asynchrone à cage par la méthode des éléments finis (Femm) sous différentes sources d'alimentation.**

---

L'entrefer affiche des valeurs de température importante dans l'essai en charge que dans l'essai à vide, ce qui s'explique que la température dans cette zone suit celle du rotor, en raison de la faible conductivité de cette zone (L'air).

En se référant au type d'alimentation on constate qu'avec l'alimentation non sinusoïdale la température augmente d'environ 4°C par rapport à l'alimentation sinusoïdale cela revient à la densité des pertes qui augmente aussi avec ce type d'alimentation.

#### **III.8 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation thermique de la machine asynchrone à cage via FEMM qui est basé sur la méthode des éléments finis, cette étude consiste à obtenir la distribution de la température préalable dans les différentes parties de la machine.

Dans la suite du travail, nous allons vérifier ces résultats obtenus dans ce chapitre avec des tests expérimentaux, ce qui nous permettra d'approuver ceux que nous avons trouvé dans ce présent chapitre et faire une étude comparative.

### **IV.1 Introduction**

Dans le chapitre précédent nous avons présenté le modèle thermique du moteur asynchrone par la méthode des éléments finis avec l'utilisation du logiciel FEMM, dans le chapitre actuel nous cherchons à approuver les résultats obtenus précédemment avec des essais expérimentaux.

Plusieurs essais seront effectués afin de déterminer la température dans les différentes régions de la machine, ce qui nous mènera à faire une étude comparative.

Pour ce faire nous procédons avec quatre essais qui sont :

- Essai à vide avec une alimentation sinusoïdale et un ventilateur interne.
- Essai à vide avec une alimentation non sinusoïdale et un ventilateur externe.
- Essai en charge avec une alimentation sinusoïdale et un ventilateur externe.
- Essai en charge avec une alimentation non sinusoïdale et un ventilateur externe.

### **IV.1 Etalonnage des thermocouples**

Pour pouvoir étalonner les thermocouples, nous avons utilisé un four dont la température varie graduellement, un thermomètre et un écopointer qui nous sert d'enregistreur de température. Et les résultats obtenus sont présentés sur la Figure IV.1.

En insérant le stator de la machine étudiée à l'intérieur du four, l'expérience était lente et les résultats n'est pas satisfaisants, le capteur du four à sa propre courbe et les températures internes ne sont pas uniformes, c'est pour cette raison qu'on a opté à faire l'étalonnage avec deux capteurs qui n'étaient pas reliés à la machine.

### **IV.2 L'enregistreur de température (écopointer)**

L'écopointer est un dispositif de mesure de température qui possède six voies de mesures, il enregistre les variables physiques en signal électrique (une différence de potentiel) comme la température, la pression, la puissance, etc. Six mesures peuvent être effectuées simultanément avec une possibilité de rajouter six autres en utilisant des commutateurs.

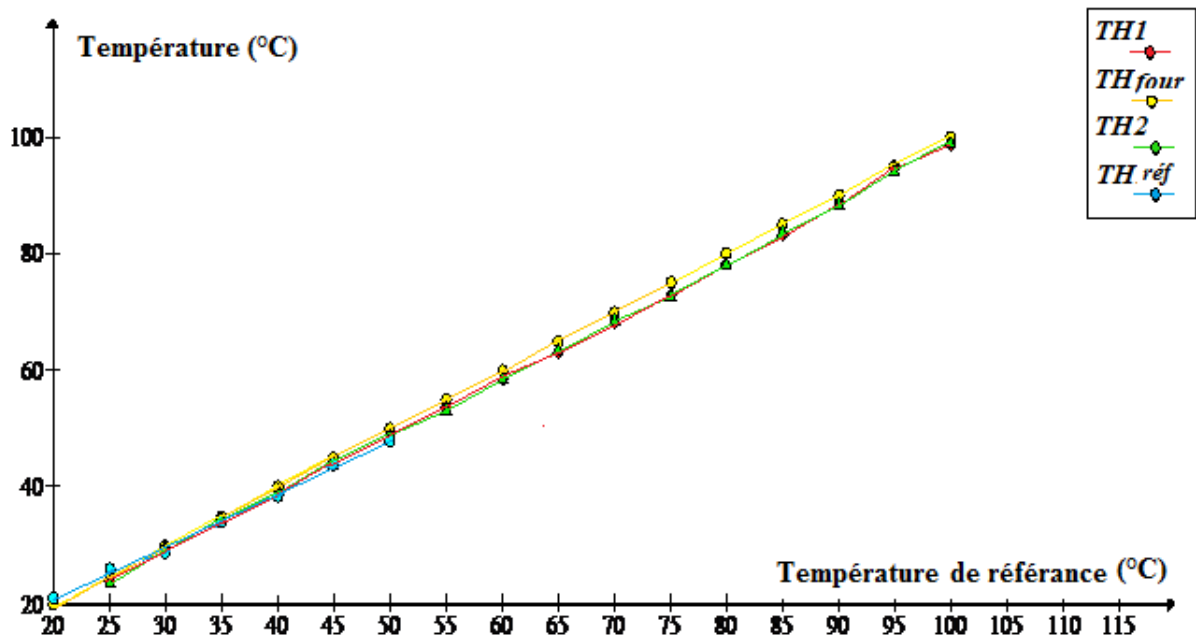


Fig.IV.1 Courbes d'étalonnage des thermocouples

➤ **Interprétation des résultats**

Les courbes obtenues montrent que la température accroît sous forme d'une droite  $T = A * T_{ref}$  avec  $A=1$ , à partir d'une valeur initiale  $T=20^{\circ}\text{C}$  qui est la température ambiante.

La température des capteurs TH1 et TH2 est presque la même que celle du four et de thermomètre, donc nous pouvons dire que les capteurs sont fiables et ils peuvent être utilisés dans la suite des expériences.

**IV.3 Présentation de la machine asynchrone étudiée**

Pour effectuer les différents essais cités dans l'introduction, on dispose d'un moteur asynchrone triphasé à cage dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Type 890-100-1064-0041.
- Marque ENEL (électro-industrie) N°22-128-02.
- Puissance absorbée 2.2 KW.
- Le courant nominal absorbé 5.2 A en triangle.
- La vitesse de rotation nominale 1410 trs/min.
- Le coefficient de puissance  $\cos\phi=0.83$ .
- La classe d'isolation F ( $155^{\circ}\text{C}$ ).

#### IV.4 Description de banc d'essai

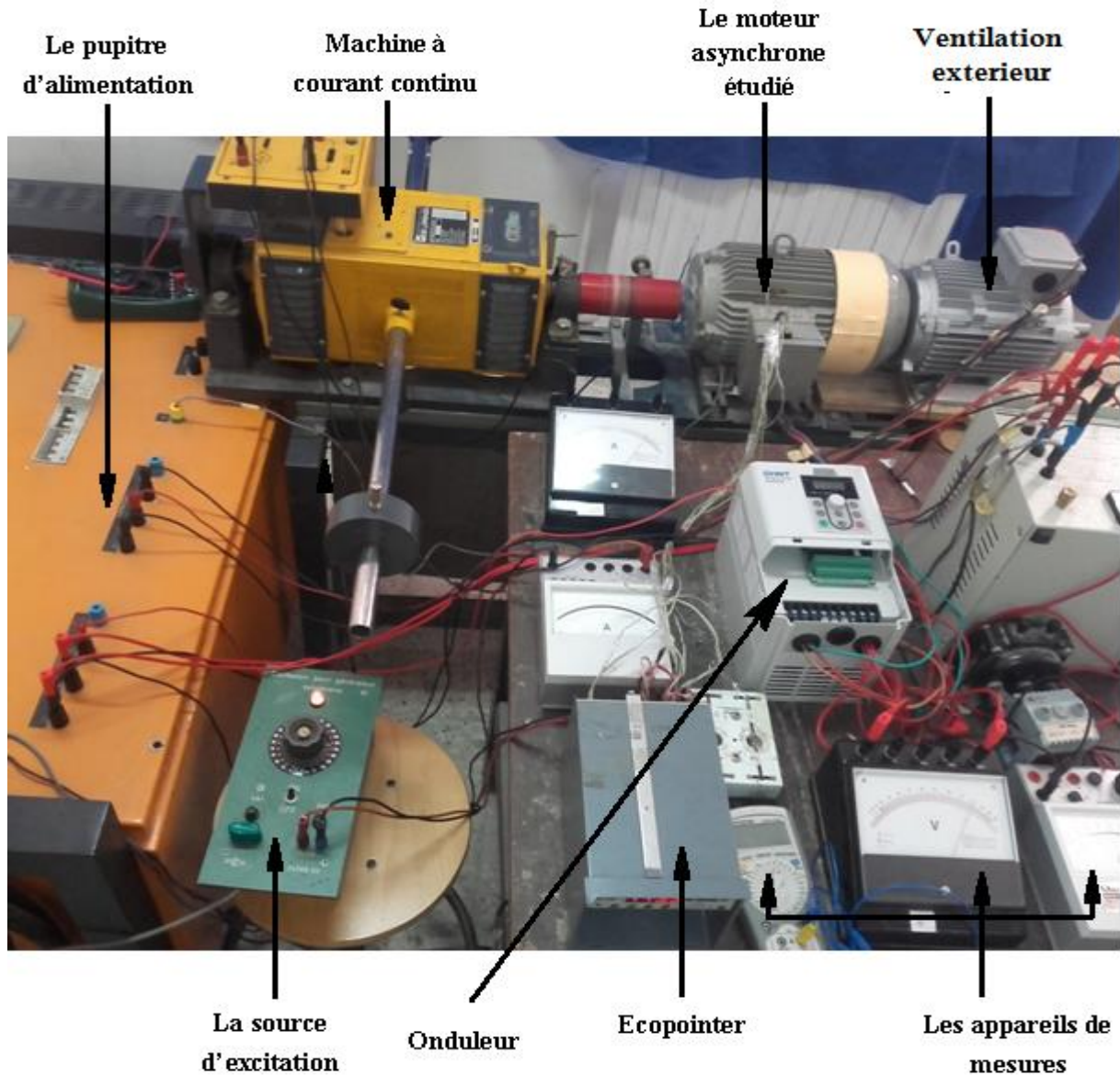


Fig.IV.2 Le banc d'essai

Pour pouvoir effectuer les différents tests de mesure de température dans la machine asynchrone à cage, nous avons disposé du matériel suivant :

- Une machine asynchrone qui ventile la machine étudiée afin de garder la ventilation constante tout le long des manipulations dont les caractéristiques sont les suivantes :
  - ✓ Le type : JM 100 LA 4 B3.
  - ✓ La marque : Seipee N°Z03152651.
  - ✓ La puissance nominale : 2.2 kW.
  - ✓ La tension nominale : 230/400 V.
  - ✓ le courant absorbé nominal: 8.55/4.92 A.

- ✓ La vitesse de rotation nominale : 1390Tr/min.
- ✓ Le coefficient de puissance : 0.81.
- ✓ La classe d'isolation : F.
- ✓ L'indice de protection (IP) : 55.
- ✓ La fréquence : 50Hz.
- Une génératrice à courant continu pour les essais en charge ; qui possède les caractéristiques suivantes :
  - ✓ Type : DL 2062.
  - ✓ La puissance nominale : 2.4 kW.
  - ✓ Tension nominale : 220 V.
  - ✓ Courant nominal : 10.9 A.
  - ✓ Vitesse de rotation nominale : 1420Tr/min.
  - ✓ Courant d'excitation : 1.6A.
  - ✓ La classe d'isolation : F.
- Un variateur de vitesse (onduleur) dont les caractéristiques sont :
  - ✓ Le type : CONSTANT TORQUE.
  - ✓ La puissance nominale : 5.5 kW.
  - ✓ Les grandeurs d'entrées : 3p AC 380V 50Hz.
  - ✓ Les variables de sorties : 3p (0~380)V 13A (0~400)Hz.
  - ✓ La norme : IEC 61800-2.
- Une source d'alimentation triphasée.
- Différents appareils de mesure (Ampèremètres, voltmètres, chronomètre, thermomètre, wattmètres).
- Capteur de température de type thermocouple.
- Un enregistreur de température (CA 625 ECOPOINTEUR).
- Des fils électriques de câblage.

#### **IV.5 L'emplacement des capteurs dans la machine asynchrone**

Le moteur faisant l'objet d'étude est doté de 7 thermocouples, placés dans les différentes zones qui constituent la machine, leur numérotation et emplacement dans le moteur est comme sont montrés sur la Figure IV.3 suivante :

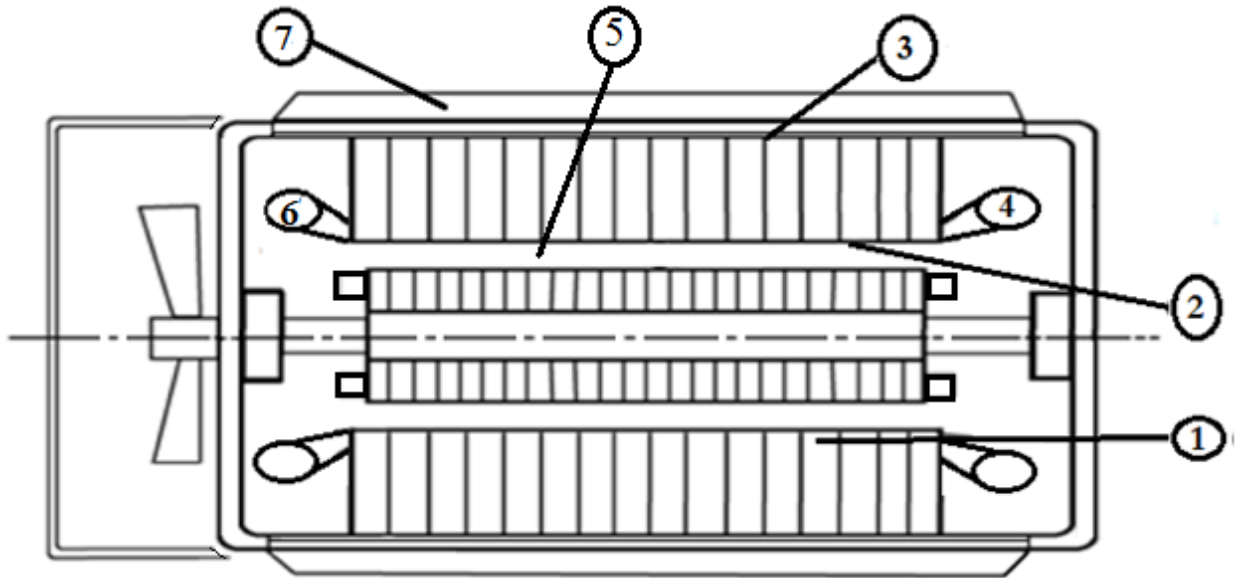


Fig.IV.3 L'emplacement des capteurs dans la machine étudiée.

TH1: L'encoche statorique.

TH5: L'entrefer.

TH2: La dent statorique.

TH6: Tête de bobine côté ventilé.

TH3: Interface.

TH7: La carcasse.

TH4: La tête de bobine côté non ventilé.

#### IV.6 L'essai à vide avec la ventilation interne

Cet essai consiste à entraîner la machine à vide avec ces valeurs nominales et relever les valeurs des températures indiquées sur l'écopointer des différents thermocouples reliés déjà à la machine.

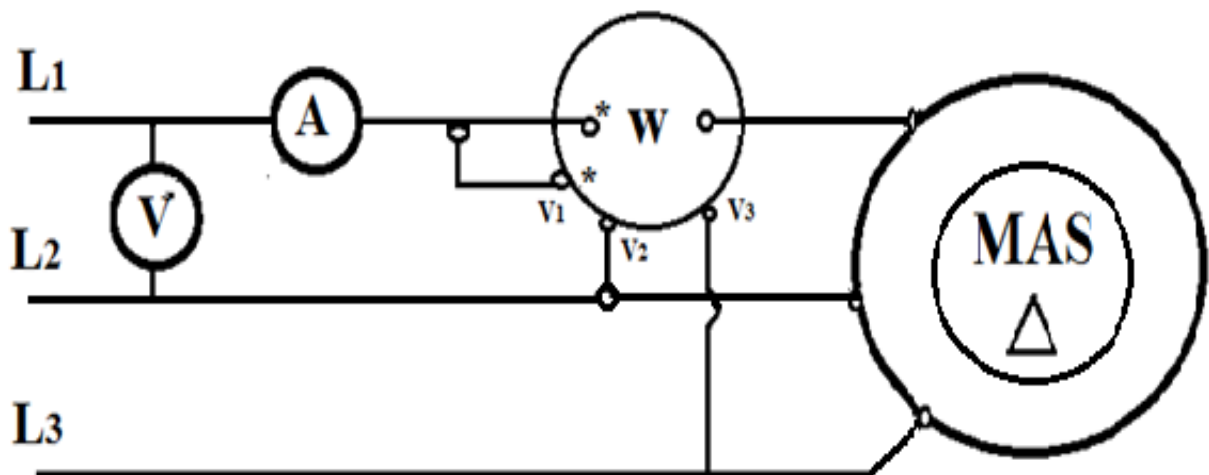


Fig.IV.4 Schéma de montage de l'essai à vide

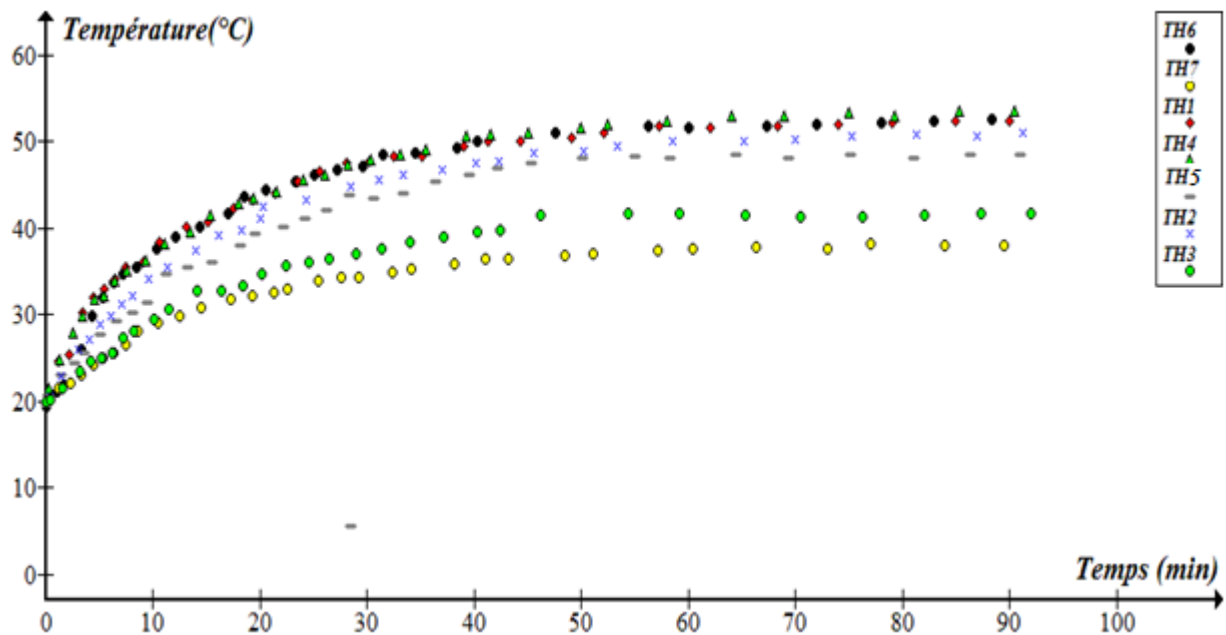
## Chapitre IV : Mesure de température d'un moteur asynchrone sous différentes charges et sources d'alimentation.

A la fin de l'essai on a relevé les valeurs des grandeurs sur les appareils de mesure qui sont les suivantes:

*Tab.IV.1 Relevé des valeurs dans l'essai à vide avec une alimentation sinusoïdale et un ventilateur interne*

Courant de ligne (A)	Tension composée (V)	Puissance Absorbée (W)	$\Delta T (^{\circ}C) = T(TH4) - (T_a)$
3	375	270	31.6

La température ambiante ( $T_a$ ) était  $21^{\circ}C$  au début, à la fin elle a atteint  $22^{\circ}C$ .



*Fig.IV.5 Courbe de température lors de l'essai à vide.*

➤ **Interprétation des résultats :**

Les courbes obtenues dans la Figure IV.5 montrent l'évolution de la température en fonction du temps dans les différentes zones de la machine faisant l'objet d'étude.

Le comportement de la température est régi par une courbe sous forme exponentielle, passant par deux régimes, le régime transitoire dont la température accroît graduellement et plus au moins rapidement jusqu'à arriver au régime permanent, où la température se stabilise à partir de 80 min.

Le capteur TH4 indique la température la plus haute dans la machine, qui est la tête de bobine côté non ventilé avec un écart de température de  $31.6^{\circ}C$  entre cette dernière et l'air

ambiant et de l'ordre de  $15.6^{\circ}\text{C}$  avec le point le moins chaud qui est indiqué par le capteur TH7 (la carcasse).

Les courbes d'échauffement évoluent sous trois catégories différentes avec des températures proches pour chaque catégorie :

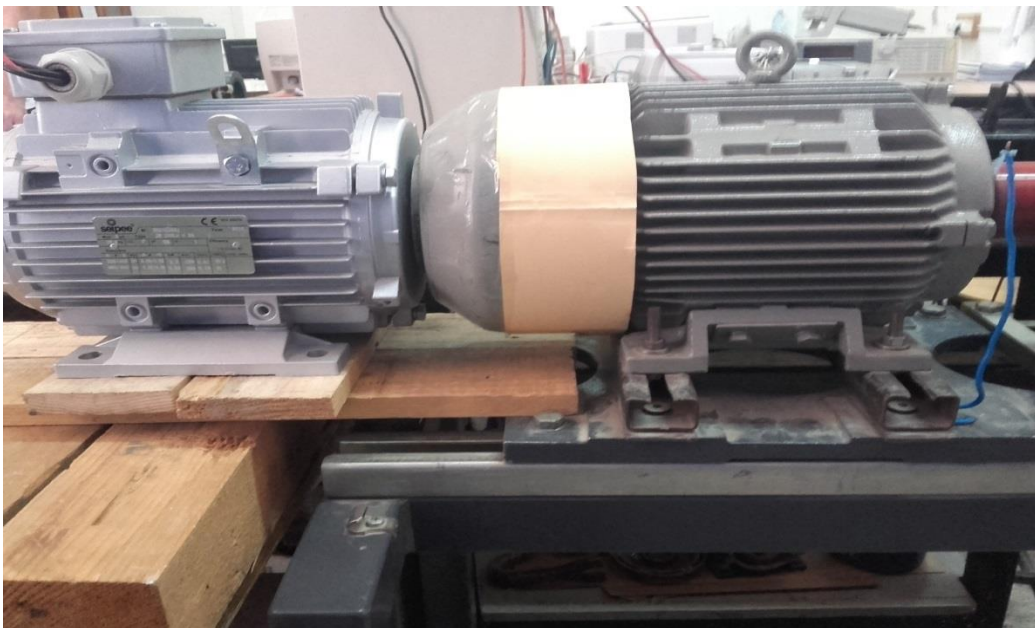
La première est celle formée par les capteurs TH4, TH6 et TH1 qui sont respectivement la tête de bobine côté non ventilé, la tête de bobine côté ventilé et l'encoche statorique, qui présentent les zones les plus chaudes de la machine.

La deuxième catégorie est présentée par les capteurs TH2 et TH5, qui sont respectivement la dent statorique et l'entrefer, les capteurs enregistrent les températures intermédiaires.

La troisième est celle formée par les capteurs Th7 et TH3 qui est respectivement la carcasse et l'interface, ces parties sont les moins chaudes dans la machines.

#### **IV.7 Essai à vide avec un ventilateur externe**

Cet essai consiste à ôter le ventilateur interne de la machine qui fait l'objet d'étude, et le monté sur une autre machine asynchrone dont la vitesse reste constante dans toutes les manipulations et cela dans le but de garder la ventilation constante dans les essais à vitesse variable (voir Figures IV.6 et IV.7).



*Fig.IV.6 Refroidissement de la machine par un ventilateur externe indépendant*

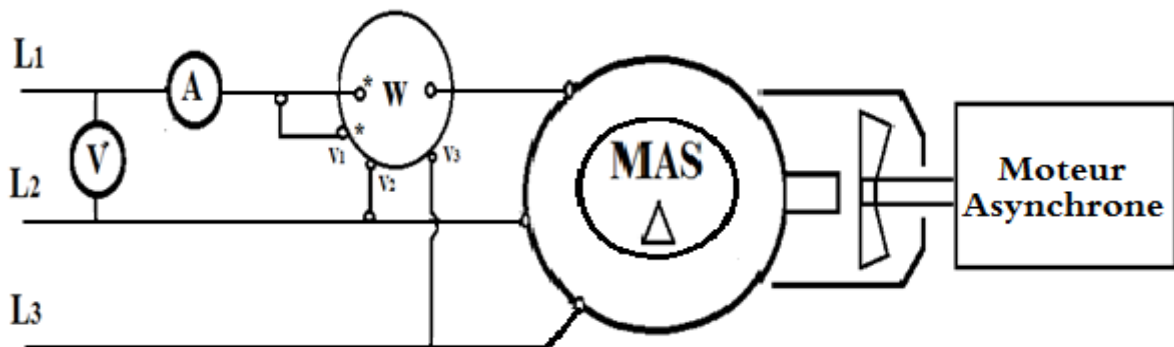
## Chapitre IV : Mesure de température d'un moteur asynchrone sous différentes charges et sources d'alimentation.

La démarche suivis dans cet essai est la même que l'essai précédent, les valeurs des grandeurs relevées à la fin de l'essai sont les suivantes :

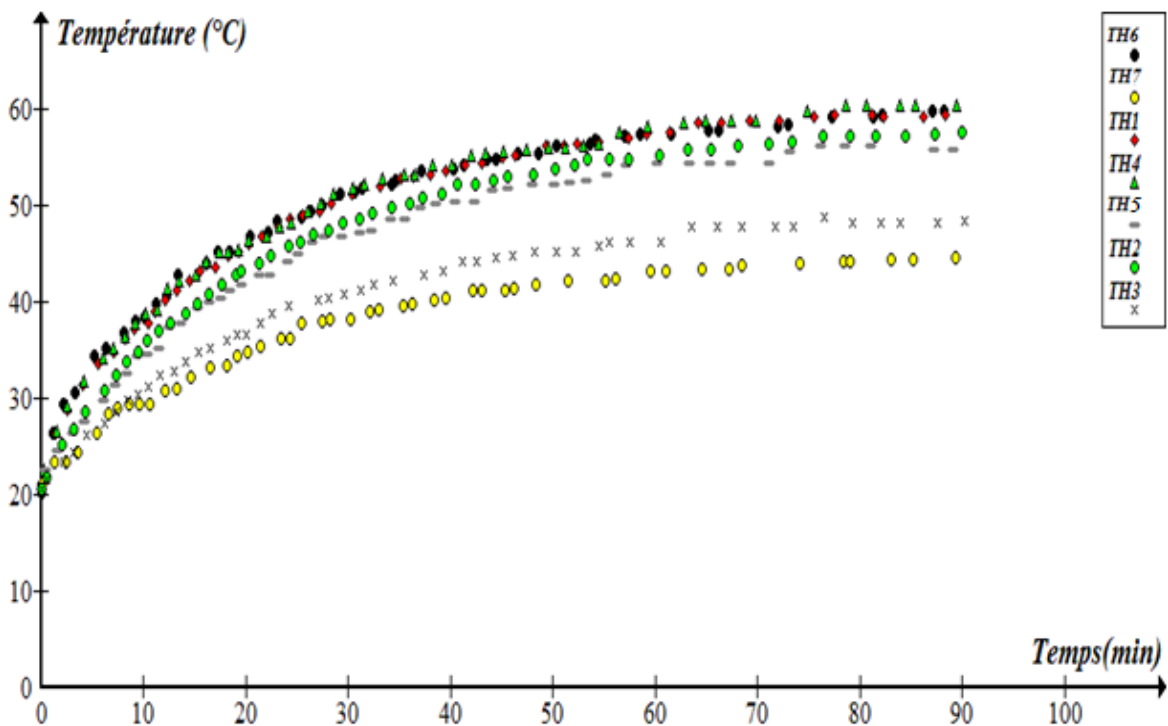
*Tab.IV.2 Relevé des valeurs dans l'essai à vide avec une alimentation sinusoïdale et ventilation externe*

Courant de ligne(A)	Tension composée (V)	Puissance Absorbée (W)	$\Delta T$ (°C) =T(TH4) - (T <sub>a</sub> )
3	374	270	35.9

La température ambiante (T<sub>a</sub>) au début de l'essai était 23°C et elle a atteint 24.5°C à la fin de l'essai.



*Fig.IV.7 Schéma de montage de l'essai à vide avec une ventilation indépendante*



*Fig.IV.8 Courbe de température lors de l'essai à vide avec un ventilateur externe*

➤ **Interprétation des résultats**

Les courbes obtenues dans la Figure IV.8 montrent la même évolution de température que l'essai à vide avec le moteur auto-ventilé montré dans la Figure IV.5 mais avec un écart de température d'environ 4°C au long de toute la manipulation.

La température augmente graduellement et plus ou moins rapidement dans le régime transitoire jusqu'à atteindre le régime permanent au bout de 80 min de même que l'essai précédent, c'est aussi le cas pour les différents capteurs qui suivent les mêmes formes avec un décalage de 7°C.

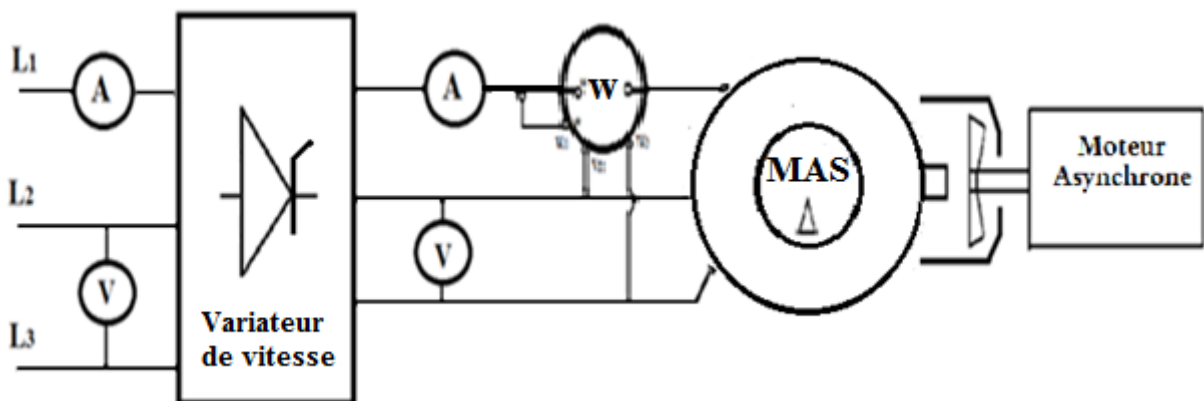
L'écart de température entre les deux essais est dû aux différents paramètres qui devront être similaires afin d'avoir des résultats typiques, ces paramètres sont :

La température ambiante, la tension d'alimentation, le courant de ligne et les conditions de refroidissement.

**IV.8 Essai à vide avec onduleur et un ventilateur externe**

Cet essai consiste à alimenter le moteur à vide avec un variateur de vitesse (onduleur) pour les différentes fréquences (50HZ, 30Hz et 10HZ) et relever les valeurs de la température, en fonction du temps, indiquées sur l'écopointer.

**IV.8.1 Présentation de schéma de montage**



*Fig.IV.9 Schéma de montage de l'essai à vide avec onduleur et une ventilation indépendante*

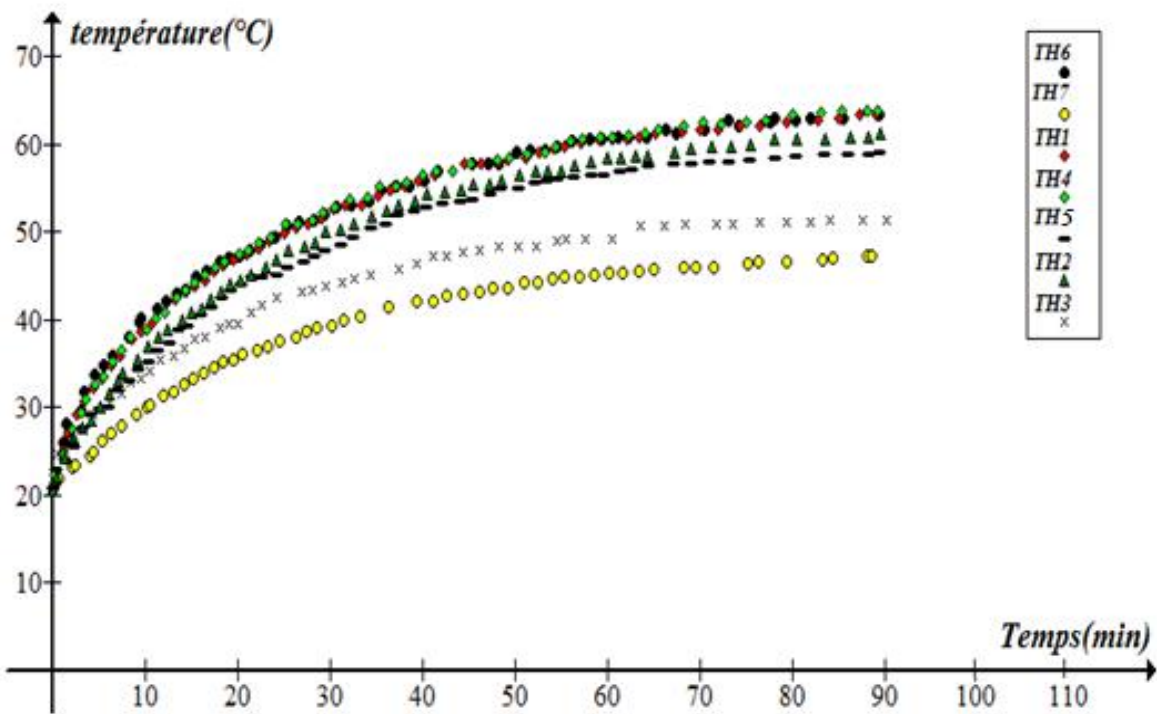
**IV.8.2 Essai à 50 Hz**

La température ambiante ( $T_a$ ) était 23°C au début, à la fin elle a atteint 23.5°C. Les différentes valeurs indiquées sur les appareils de mesures à la fin de l'essai sont les suivantes :

**Chapitre IV : Mesure de température d'un moteur asynchrone sous différentes charges et sources d'alimentation.**

*Tab.IV.3 Relevé des valeurs dans l'essai à vide avec une alimentation non sinusoïdale à 50Hz et un ventilateur externe*

Tension de réseau (V)	Courant de réseau (A)	Tension composée (V)	Courant de ligne (A)	Puissance absorbée (W)	$\Delta T (^{\circ}C)=T(TH4)- (T_a)$
372	1.3	482	3.6	380	40.7



*Fig.IV.10 Courbe de températures lors de l'essai à vide avec un onduleur à 50Hz et ventilation externe*

➤ **Interprétation des résultats**

La Figure IV.10 montre la croissance de la température en fonction du temps lors de l'essai à vide avec une alimentation non sinusoïdale et un ventilateur indépendant.

Le TH4 (La tête de bobine non ventilée) indique le point le plus chaud de la machine avec une température de 64.2 °C au régime permanent, cette température est atteinte au bout de 90 min.

Les courbes formées par les capteurs sont aussi réparties en 3 catégories pareillement que les essais précédents dont le TH4, le TH6 et Le TH1 forment les courbes les plus chaudes de la machine, le TH1 et le TH2 forment les courbes des températures intermédiaires et en dernier le TH7 et Le TH3 forment les courbes des températures basses dans la machine.

IV.8.3 Comparaison entre l'alimentation sinusoïdale et non sinusoïdale à 50Hz dans l'essai à vide

Tab.VI.4 Les différentes grandeurs lors de l'essai à vide avec les deux alimentations sinusoïdale et non sinusoïdale

	Courant du réseau (A)	Tension du réseau (V)	Courant de ligne (A)	Tension composée (v)	Puissance absorbée (W)	$\Delta T (^{\circ}C) = T(TH4) - (T_a)$
Alimentation sinusoïdale	3	374	3	374	290	35.9
Alimentation non sinusoïdale	1.3	372	3.6	482	380	40.7

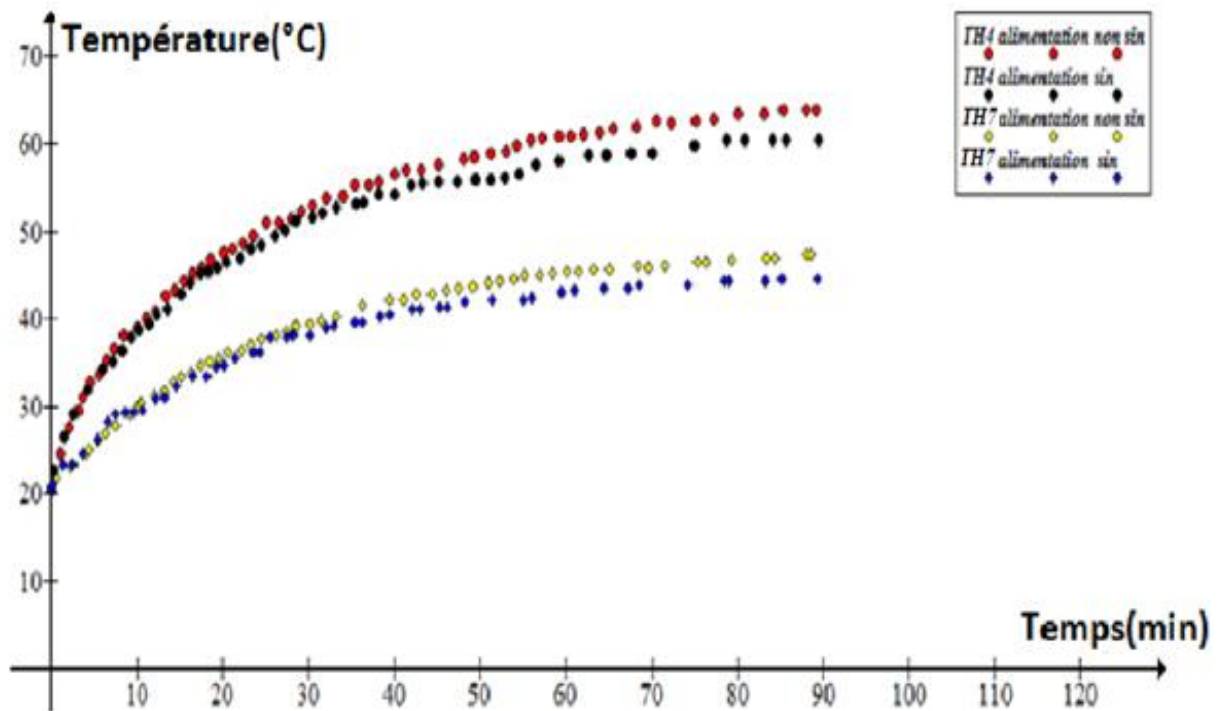


Fig.IV.11 courbes de température avec les deux alimentations sinusoïdale et non sinusoïdale des capteurs TH7 et TH4

➤ **Interprétation des résultats**

Les courbes de la Figure IV.11 Présentent l'évolution de la température dans l'essai à vide avec les deux alimentations sinusoïdale à 50Hz et non sinusoïdale à 50HZ pour les deux capteurs TH7 et TH4 qui sont respectivement le point le moins chaud et le point plus chaud dans la machine.

D'après le Tableau IV.4 nous constatons une augmentation des valeurs du courant de ligne et de la tension composée donc aussi de la puissance absorbée (un écart de 90W) dans

## Chapitre IV : Mesure de température d'un moteur asynchrone sous différentes charges et sources d'alimentation.

l'alimentation non sinusoïdale par rapport à l'alimentation sinusoïdale, ce qui est exprimé par une élévation de température des capteurs TH7 et TH4 de 4.8°C comme le montre la Figure IV.11.

L'évolution de la température des capteurs TH7 et TH4 est montré dans la Figure IV.11, au régime transitoire les capteurs suivent les mêmes formes avec des valeurs très proches dans les deux alimentations, à partir de 40 min on remarque l'apparition d'un écart de température.

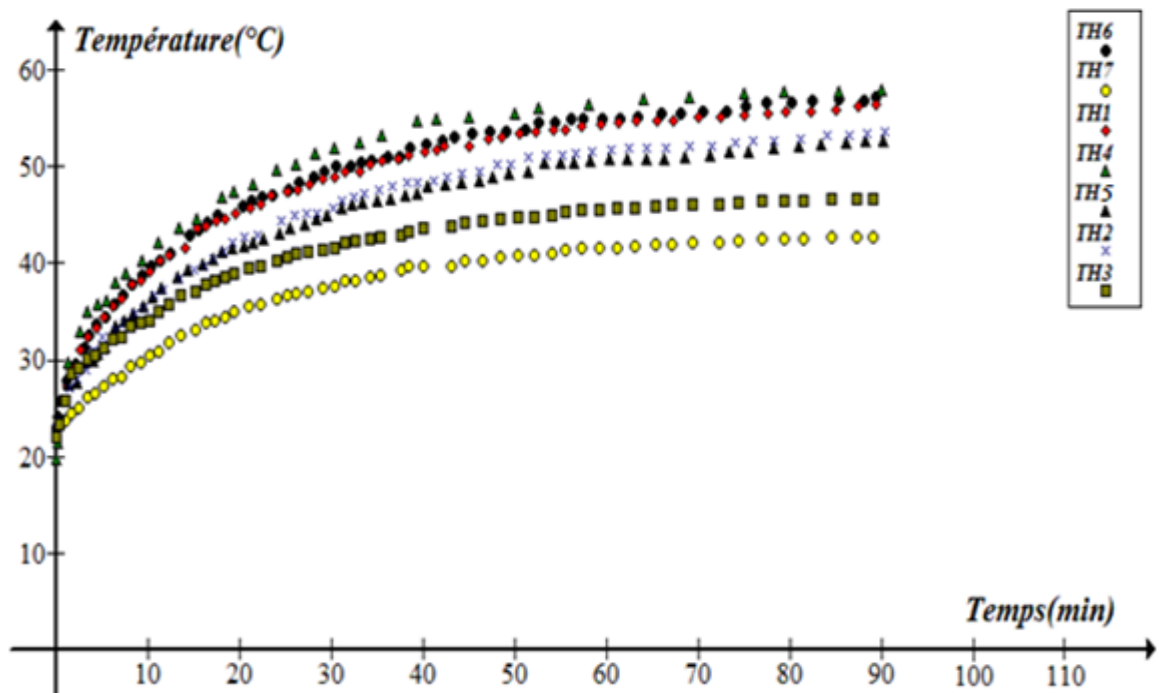
En dernier nous pouvons conclure que l'alimentation non sinusoïdale a engendrée des pertes additionnelles (supplémentaires), qui sont exprimé par une augmentation de la puissance absorbée et qui se manifestent sous forme de température.

### IV.8.4 Essai à 30HZ

La température ambiante  $T_a$  était 23°C au début, à la fin elle a atteint 23.5°C. Les différentes valeurs indiquées sur les appareils de mesures sont les suivantes :

*Tab.IV.5 Relevé des valeurs dans l'essai à vide avec une alimentation non sinusoïdale à 30Hz et un ventilateur externe*

Tension du réseau (V)	Courant du réseau (A)	Tension composée (V) (sortie de l'onduleur)	Courant de ligne (A) (sortie de l'onduleur)	Puissance absorbée (W)	$\Delta T$ (°C) = T(TH4) - $T_a$
369	1.2	340	3.65	315	35.2



*Fig.IV.12 Courbe de température lors de l'essai à vide avec un onduleur à 30Hz et ventilateur externe*

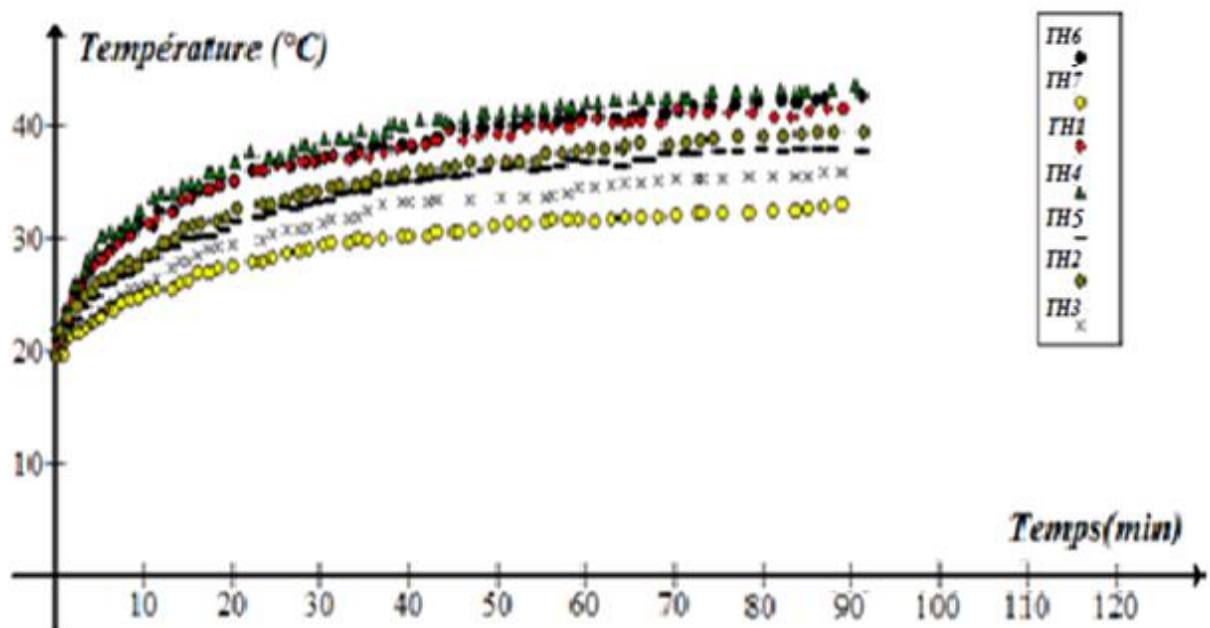
## Chapitre IV : Mesure de température d'un moteur asynchrone sous différentes charges et sources d'alimentation.

### IV.8.5 Essai à 10Hz

La température ambiante  $T_a$  était 22°C au début, à la fin elle a atteint 23°C. Les différentes valeurs indiquées sur les appareils de mesures sont les suivantes :

*Tab.IV.6 Relevé des valeurs dans l'essai à vide avec une alimentation non sinusoïdale à 10Hz et une ventilation externe*

Courant du réseau(A)	Tension du réseau (V)	Tension composée (V)	Courant de ligne (A)	Puissance absorbée (W)	$\Delta T$ (°C) = T(TH4) - $T_a$
0.85	366	330	3.4	198	21.5



*Fig.IV.13 Courbe de température lors de l'essai à vide avec un onduleur à 10Hz et un ventilateur externe*

*Tab.IV.7 Les grandeurs dans l'essai à vide alimenté en non sinusoïdale pour les trois fréquences (50Hz, 30Hz et 10Hz)*

	Courant du réseau (A)	Tension du réseau (V)	Courant de ligne (A)	Tension composée (V)	Puissance absorbée (W)	$\Delta T$ (°C) = T(TH4) - $T_a$
<b>50 Hz</b>	1.3	372	3.6	482	380	40.7
<b>30 Hz</b>	1.2	369	3.65	340	315	35.2
<b>10 Hz</b>	0.85	366	3.4	330	198	21.5

➤ **Interprétation des résultats**

D'après les Figures (IV.10, IV.12 et IV.13) et le Tableau IV.7, nous constatons sur l'effet de la fréquence de variateur sur l'ensemble de pertes engendrées dans la machine étudiée, ce que s'explique par :

Pour 50 Hz  $\Delta T = 40.7^\circ\text{C}$  et la puissance absorbée est de 380 W.

Pour 30 Hz  $\Delta T = 35.2^\circ\text{C}$  et la puissance absorbée est de 315 W.

Pour 10 Hz  $\Delta T = 21.5^\circ\text{C}$  et la puissance absorbée est de 198 W.

D'après ces résultats nous concluons que lorsque la fréquence baisse les pertes (la puissance absorbée) diminuent, donc la température chute, cela s'explique par les diminutions des pertes joules et les pertes fers qui sont proportionnelles à la fréquence.

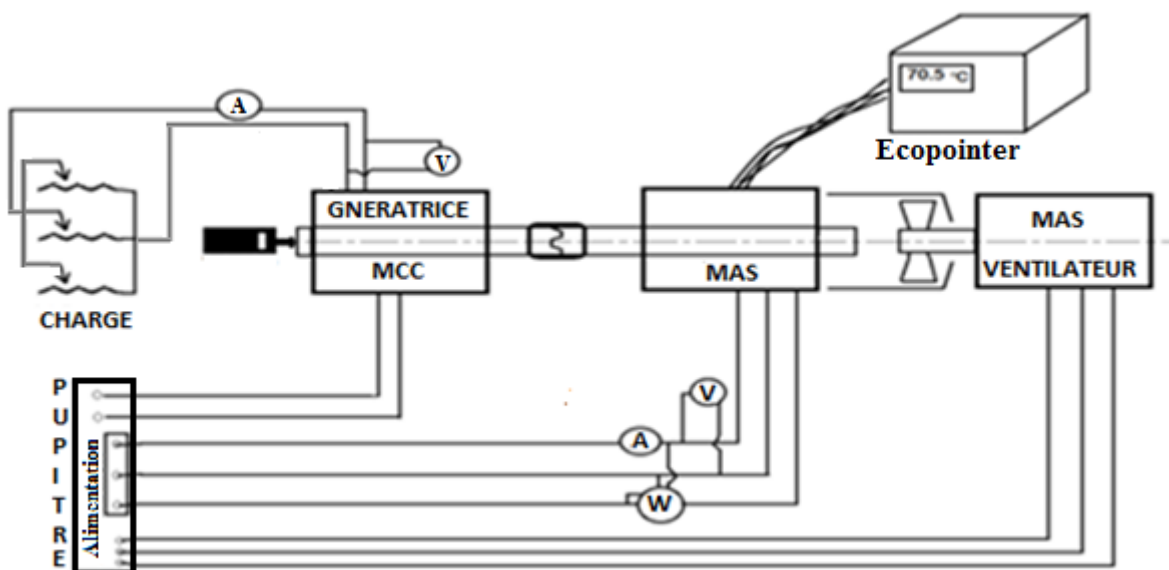
**IV.9 Essai en charge**

Dans cet essai nous allons garder le même montage monté précédemment et couplé une charge (une génératrice à courant continu) sur l'arbre de la machine étudiée, cette dernière débitera sur des résistances externes.

Deux essais sont effectués, une fois avec une alimentation sinusoïdale et une autre fois avec une alimentation non sinusoïdale, ensuite on fait un relevé des différentes valeurs des grandeurs affichées sur les appareils de mesure ainsi que la température des capteurs indiqués sur l'écopointer.

**IV.9.1 Essai à 50Hz en charge nominale avec une alimentation sinusoïdale**

➤ **Présentation du schéma de montage**



*Fig.IV.14 Schéma de montage de l'essai en charge avec une alimentation sinusoïdale*

## Chapitre IV : Mesure de température d'un moteur asynchrone sous différentes charges et sources d'alimentation.

La température ambiante  $T_a$  était  $23.5^\circ\text{C}$  au début de l'essai et elle a atteint  $25.5^\circ\text{C}$  à la fin.

➤ **Relevé des grandeurs du moteur asynchrone**

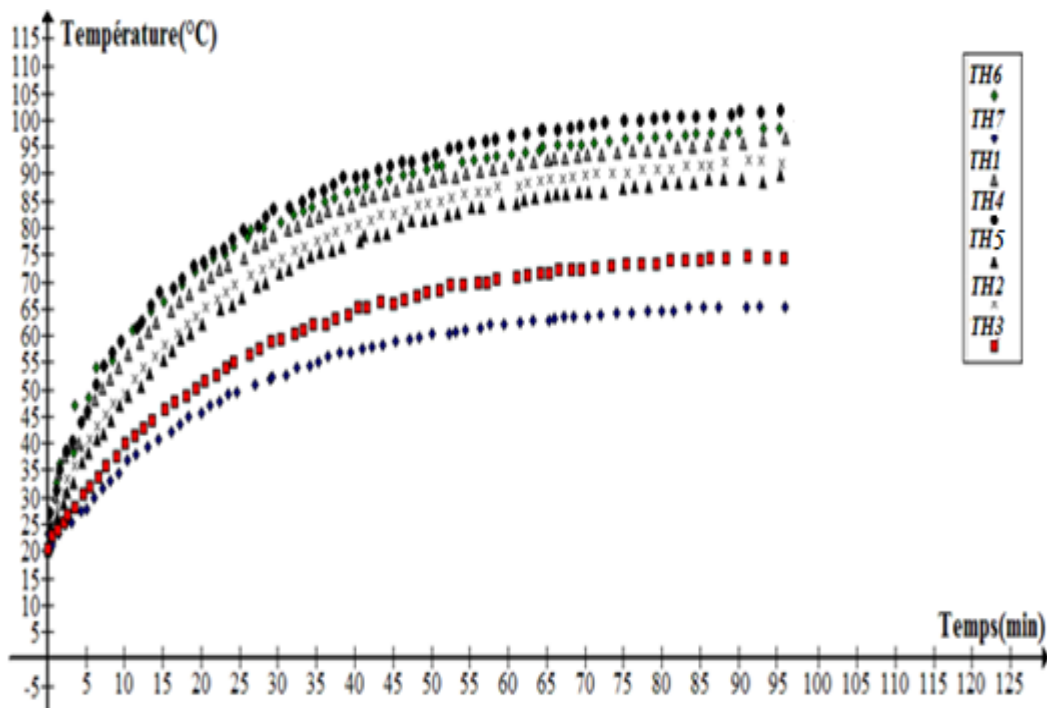
*Tab.IV.9 Relevé des valeurs du moteur asynchrone dans l'essai en charge avec une alimentation sinusoïdale*

La tension composée (V)	Le courant de ligne (A)	La puissance absorbée (W)	La vitesse de rotation (Tr/min)	$\Delta T (^{\circ}\text{C})$ = $T(\text{TH4})-T_a$
371	5.01	2529	1414	89.7

➤ **Relevé des grandeurs de la génératrice à courant continu**

*Tab.IV.10 Relevé des valeurs de la génératrice à courant continu dans l'essai en charge avec une alimentation sinusoïdale*

La tension d'excitation (V)	Le courant d'excitation (A)	La tension induite (V)	Le courant induit (A)	Le couple de charge(N.m)
185	1.36	216	8.2	15



*FigIV.15 Courbes de température lors de l'essai en charge avec une alimentation sinusoïdale*

## Chapitre IV : Mesure de température d'un moteur asynchrone sous différentes charges et sources d'alimentation.

### ➤ Interprétation des résultats

Les courbes obtenues dans la Figure IV.15 montrent la croissance de la température des différents thermocouples au sein de la machine en fonction du temps dans la machine dans l'essai en charge avec une alimentation sinusoïdale.

Les courbes de température évoluent sous forme d'une exponentielle lentement avec deux régimes, au démarrage la température accroît graduellement et plus au moins rapidement dans un régime dit transitoire jusqu'à arriver au régime permanent d'où la température tend à se stabiliser au bout de 85min. Les thermocouples suivent toujours les mêmes catégories que les essais effectués précédemment, tout de même avec la même répartition.

### IV.9.2 Essai à 50Hz en charge nominale avec une alimentation non sinusoïdale

#### ➤ Présentation de schéma de montage

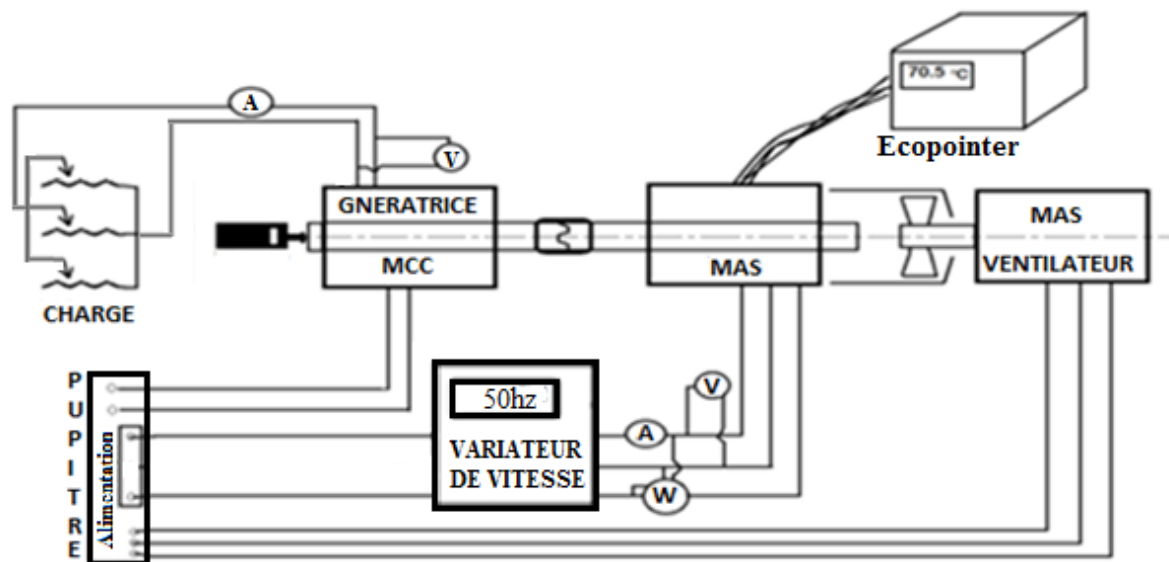


Fig.IV.16 Schéma de montage de l'essai en charge avec une alimentation non sinusoïdale

La température ambiante  $T_a$  était  $23.5^{\circ}\text{C}$  au début de l'essai et elle a atteint  $25.5^{\circ}\text{C}$  à la fin, et les valeurs relevées du moteur asynchrone sont les suivantes

Tab.IV.11 Relevé des valeurs du moteur asynchrone dans l'essai en charge avec une alimentation non sinusoïdale.

Tension de source(V)	Tension composée (V)	Courant de ligne(A)	Puissance absorbée(w)	Vitesse de rotation (Tr/min)	$\Delta T (^{\circ}\text{C}) = T(\text{TH4}) - T_a$
374	465	5.1	2700	1430	92.4

## Chapitre IV : Mesure de température d'un moteur asynchrone sous différentes charges et sources d'alimentation.

### ➤ Relevé des grandeurs de la génératrice à courant continu

Tab.IV.12 Relevé des valeurs de la génératrice à courant continu dans l'essai en charge nominale avec une alimentation non sinusoïdale

Tension d'excitation (V)	Courant d'excitation (A)	Tension induite (V)	Courant induit (A)	Couple de charge (N.m)
188	1.36	218	8.25	15

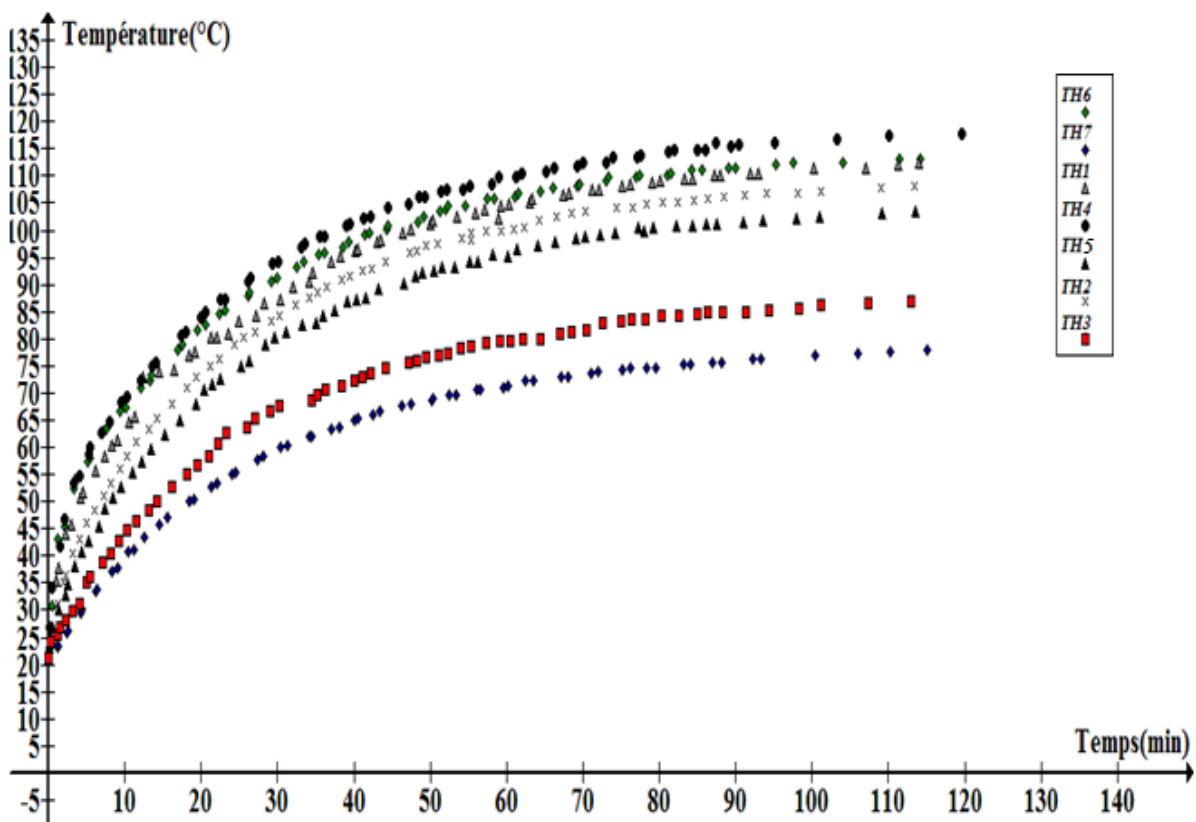


Fig.IV.17 Courbes de température lors de l'essai en charge avec une alimentation non sinusoïdale

### ➤ Interprétation des résultats

Les courbes de la Figure IV.17 montrent l'évolution de la température en fonction du temps dans les différentes parties de la machine présentée par les sept thermocouples dans l'essai en charge nominale avec une alimentation via le variateur à 50Hz.

Pendant le régime transitoire, on constate que la température accroît lentement jusqu'à atteindre le régime permanent à partir de 85 min.

## Chapitre IV : Mesure de température d'un moteur asynchrone sous différentes charges et sources d'alimentation.

Tout de même que l'essai en charge avec l'alimentation sinusoïdale, le TH4 qui est sur la tête de bobine côté non ventilé présente le point le plus chaud avec  $\Delta T (^{\circ}\text{C}) = 92.4^{\circ}\text{C}$  et le TH8 qui relève la température dans la carcasse présente la température la moins chaude.

### IV.9.3 Comparaison entre l'alimentation sinusoïdale et non sinusoïdale à 50Hz dans l'essai en charge

*Tab.IV.13 Relevé des valeurs pour les deux types d'alimentation sinusoïdale et non sinusoïdale*

<b>Alimentation sin</b>	<b>La tension de source(V)</b>	<b>La tension composée (V)</b>	<b>Le courant de ligne(A)</b>	<b>La puissance absorbée(w)</b>	$\Delta T (^{\circ}\text{C}) = T(\text{TH4}) - T_a$	<b>Le couple de charge (N.m)</b>
	371	371	5.01	2529	89.7	15
	<b>La vitesse de rotation (Tr/min)</b>	<b>La tension d'excitation (V)</b>	<b>Le courant d'excitation (A)</b>	<b>La tension induite (V)</b>	<b>Le courant induit</b>	
	1414	185	1.36	216	8.2	
<b>Alimentation non sin</b>	<b>La tension de source(V)</b>	<b>La tension composée (V)</b>	<b>Le courant de ligne(A)</b>	<b>La puissance absorbée(w)</b>	$\Delta T (^{\circ}\text{C}) = T(\text{TH4}) - T_a$	<b>Le couple de charge (N.m)</b>
	374	465	5.1	2700	92.4	15
	<b>La vitesse de rotation (Tr/min)</b>	<b>La tension d'excitation (V)</b>	<b>Le courant d'excitation (A)</b>	<b>La tension induite (V)</b>	<b>Le courant induit</b>	
	1430	188	1.36	218	8.25	

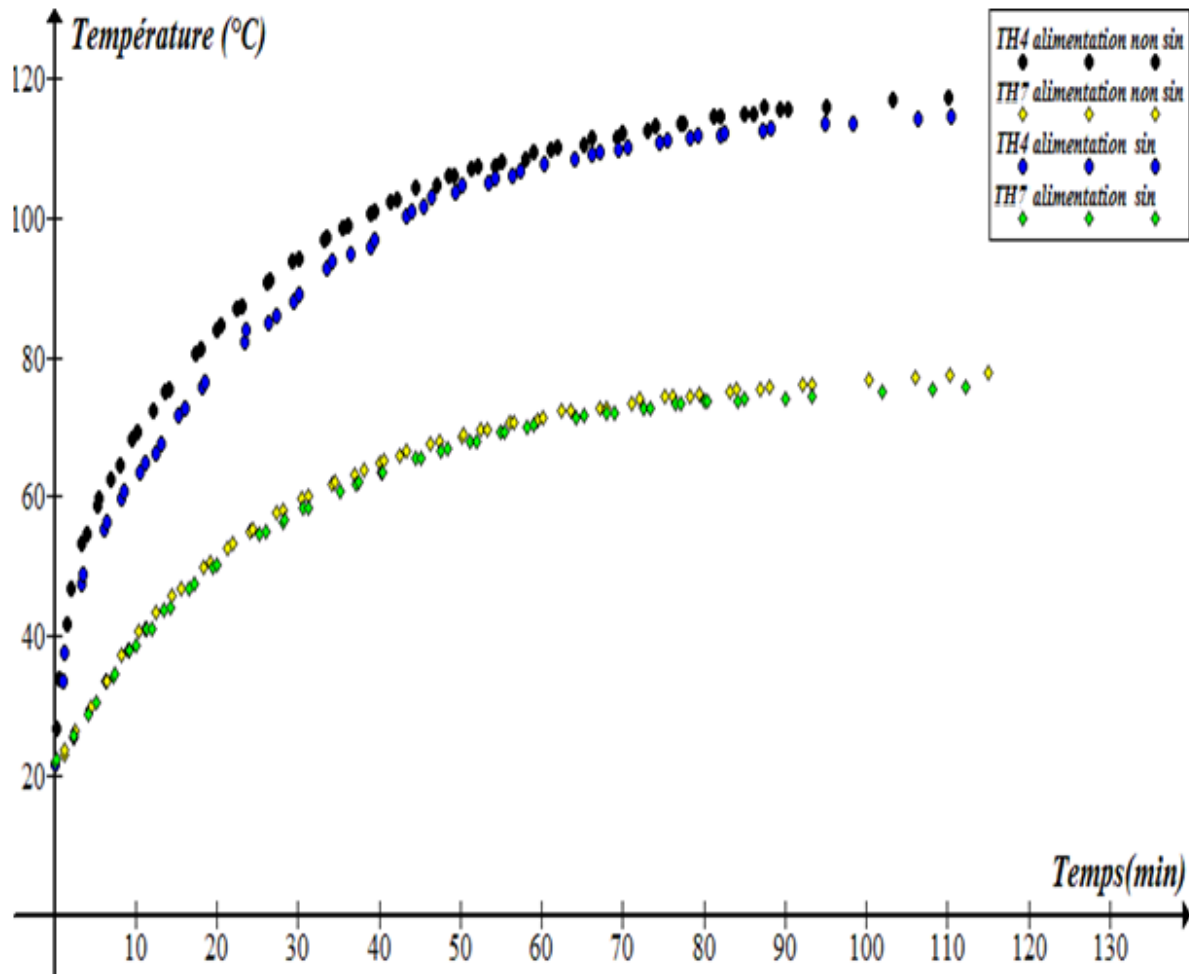


Fig.IV.18 Les courbes de température avec les deux alimentations sinusoïdale et non sinusoïdale des capteurs TH7 et TH4

➤ **Interprétation des résultats**

Le Tableau IV.13 et la Figure IV.18 illustrent une comparaison entre les différentes grandeurs caractérisant la machine et l'évolution de la température dans le moteur avec les deux alimentations sinusoïdales et non sinusoïdales à 50Hz à couple nominal.

Comme il est montré dans le Tableau IV.13, les valeurs des différentes grandeurs relevées sont presque similaires à l'exception la puissance absorbée et la tension composée, ce qui est dû à l'alimentation via le variateur. Ce dernier fournit une tension sous forme d'un signal carré aussi les erreurs susceptibles qui dû à la lecture et la fiabilité des appareils de mesures.

La Figure IV.19 montre l'évolution de la température de deux capteurs (TH4 et TH7) de la machine qui présente la partie la plus chaude de la machine (TH4) et la partie la moins chaude (TH7). Nous constatons qu'avec l'alimentation non sinusoïdale via le variateur une augmentation de la température par rapport à l'alimentation sinusoïdale dans les environs de

4°C, donc à partir de cela nous pouvons dire que l'alimentation non sinusoïdale a engendré des pertes supplémentaires.

L'augmentation des pertes supplémentaires dans l'alimentation non sinusoïdale peut-être expliqué par les harmoniques engendrées par cette dernière, qui se présentent dans les signaux (tension et courant).

#### **IV.10 Explication par rapport aux thermocouples**

Durant toutes les expériences les thermocouples ont occupé toujours les mêmes positions ce qu'on peut expliquer par :

- Au niveau du stator le thermocouple TH4 qui est la tête de bobine côté non ventilé présente le point le plus chaud de la machine ce qui est dû aux pertes supplémentaires causées par les fuites d'extrémités qui sont importantes dans ce point ajoutant les pertes joules, aussi cette zone est moins ventilée que les autres parties de la machine. En deuxième position il vient le thermocouple TH6 qui indique la température de la bobine côté ventilé pour les même raison que le thermocouple TH4 mais cette zone est mieux refroidis vu qu'elle est exposée au ventilateur. Le thermocouple TH1 placé sur l'encoche statorique vient en troisième position et cela s'explique par les enroulements logés à l'intérieur de l'encoche qui résultent des pertes joules importante à cause de passage du courant. La dent statorique (TH2) vient en quatrième position en raison de changement de chaleur entre l'encoche statorique et cette zone.
- L'entrefer (TH5) prend la cinquième position, cette zone ne possède pas de source de chaleur mais le capteur TH5 indique une température importante, cela s'explique qu'il en est contact avec le rotor qui est le siège des pertes joules rotoriques aussi à la bonne conductivité de l'Aluminium qui constitue la cage de ce dernier.
- L'interface (Th3) vient en sixième position cela s'explique par le changement de chaleur entre cette zone et la culasse statorique qui est de même le siège des pertes fers.
- La carcasse (TH7) présente le point le moins chaud dans la machine cela est dû à l'absence de source de chaleur dans cette zone, donc le capteur TH7 enregistre la température évacuées par le refroidissement externe.

#### **IV.11 Comparaison entre les valeurs de la température simulée et mesurée**

Dans les tableaux ci-dessous nous présenterons les différentes valeurs des températures obtenues par les deux méthodes (mesure et simulation) ce qui nous permettra de faire une étude comparative.

**Chapitre IV : Mesure de température d'un moteur asynchrone sous différentes charges et sources d'alimentation.**

*Tab.IV.14 Comparaison des résultats simulés et mesurés dans l'essai à vide avec une alimentation sinusoïdale à 50Hz*

La composante	Température °C	
	Mesurée	Simulée
La tête de bobine non ventilée	60.4	
La tête de bobine ventilée	59.8	
L'entrefer	55.6	51.73
L'encoche statorique	59.4	59.2
La carcasse	44.6	44.69
La dent statorique	57.6	56.38
L'interface	48.4	48.02

*Tab.IV.15 Comparaison des résultats simulés et mesurés dans l'essai à vide avec une alimentation non sinusoïdale à 50Hz*

La composante	Température °C	
	Mesurée	Simulée
La tête de bobine non ventilée	65.2	
La tête de bobine ventilée	64.3	
L'entrefer	60.6	58.7
L'encoche statorique	62.8	66.38
La carcasse	48.5	48.6
La dent statorique	62.8	62.54
L'interface	57.8	52.69

*Tab.IV.16 Comparaison des résultats simulés et mesurés dans l'essai en charge nominale avec une alimentation sinusoïdale à 50Hz*

La composante	Température °C	
	Mesurée	Simulée
La tête de bobine non ventilée	115.3	
La tête de bobine ventilée	110.5	
L'entrefer	101.9	115.90
L'encoche statorique	110	108.36
La carcasse	76.1	76.29
La dent statorique	105.4	92.32
L'interface	84.1	80.64

## Chapitre IV : Mesure de température d'un moteur asynchrone sous différentes charges et sources d'alimentation.

*Tab.IV.17 Comparaison des résultats simulés et mesurés dans l'essai en charge nominale avec une alimentation non sinusoïdale à 50Hz*

La composante	Température °C	
	Mesurée	Simulée
La tête de bobine non ventilée	117.9	
La tête de bobine ventilée	113.2	
L'entrefer	103.5	109
L'encoche statorique	112.3	119
La carcasse	77.9	78.19
La dent statorique	108.3	93.49
L'interface	86.9	82.25

En analysant les résultats de la comparaison affichés sur les tableaux au-dessus on peut affirmer que le modèle théorique réalisé par le logiciel FEMM donne une distribution de la température presque similaire que le modèle pratique.

L'écart entre les deux modèles est dû aux différentes erreurs qui peuvent être expliquées par plusieurs facteurs :

- La conductivité des matériaux qui est susceptible aux changements de valeurs.
- Les échanges de température avec le milieu extérieur.
- Les erreurs dans les calculs de pertes et densité de perte.
- L'usure de matériel.
- Les hypothèses simplificatrices dans la simulation.

### IV.11 Conclusion

Dans ce dernier chapitre nous avons effectué des tests expérimentaux sur la machine asynchrone à cage avec les deux alimentations sinusoïdale et non sinusoïdale afin de valider le modèle théorique, aussi extraire les données nécessaire à ce dernier (pertes, température et conditions aux limites).

Une comparaison est obtenue dans le but de déduire l'effet du type d'alimentation sur les pertes, donc sur la température, aussi cherché à approuver les résultats obtenus précédemment par simulation et ceux trouver expérimentalement.

Dans l'essai à vide on a pu travailler avec les deux types d'alimentations ainsi qu'avec les différentes fréquences, les résultats montrent que:

- Dans les essais à fréquence constante on a remarqué une élévation de température avec l'alimentation non sinusoïdale par rapport à l'alimentation sinusoïdale, ce qui s'explique par les pertes supplémentaires causées par l'effet des harmoniques.
- Dans les essais à fréquence variable on a remarqué une chute de température à chaque fois qu'on descend en fréquence, ce qui s'explique par la diminution des pertes fer dans le fer statorique, ces dernières dépendent de la tension et de la fréquence d'alimentation.

Dans l'essai en charge on s'est limité à deux essais à 50Hz avec les deux alimentations sinusoïdale et non sinusoïdale, parce qu'en descendant en fréquence on n'arrive pas à avoir le couple de charge nominal, les valeurs du courant d'excitation et du courant induit dépassent les valeurs nominales indiquées sur la plaque signalétique du moteur à courant continu. En comparant les deux essais, on peut dire aussi que l'alimentation non sinusoïdale a engendrée une élévation de température donc des pertes supplémentaires causées par la fréquence harmonique.

Dans le cadre de notre travail nous avons travaillé sur le comportement thermique d'une machine asynchrone à cage d'une puissance de 2.2 kW qui nous a été proposé au laboratoire de C.M de l'U.M.M.T.O, et l'effet de la nature de la source d'alimentation et de la fréquence sur la variation de la température.

Dans les deux premières parties nous avons donné un aperçu sur les différentes sources de chaleurs existantes dans la machine, qui sont causées par des pertes, ainsi que les différents modes de transfert de chaleurs.

Au troisième chapitre nous avons simulé le modèle thermique adopté à la machine étudiée, cela après avoir tracé la structure de la machine en tenant compte des différentes pertes qui permettent de calculer la densité de pertes dans chaque partie de la machine, ainsi les conditions aux limites.

Le quatrième chapitre est consacré à la partie pratique, sept essais sont effectués sous deux types de sources d'alimentations et pour différentes fréquences. Les objectifs assignés à cette partie d'étude concernent:

- L'extraction des différents paramètres (Pertes, températures...) associés au modèle thermique ainsi que sa validation.
- Déduire sur l'effet de la source d'alimentation et de la fréquence sur la variation de la température.

La comparaison entre la distribution de la température dans la modélisation et dans la pratique a donné des résultats presque similaires et satisfaisants, ce qui permet la validation du modèle thermique.

L'ensemble des essais a montré l'effet de la source et de la fréquence d'alimentation sur le comportement thermique de la machine. D'après les résultats obtenus on peut dire que la source non sinusoïdale engendre des pertes supplémentaires qui se manifestent par une élévation de la température dans les différentes parties de la machine.

**Annexe A : Caractéristiques et dimensions de la machine asynchrone étudiée et du variateur de fréquence**

*Tab.A.1 Caractéristiques nominales de la machine étudiée [5]*

<b>Caractéristiques</b>	<b>Valeurs</b>	<b>unités</b>
<b>Puissance utile</b>	2.2	KW
<b>Nombre de phases</b>	3	-
<b>Fréquence d'alimentation</b>	50	Hz
<b>Vitesse de rotation de champ tournante</b>	1500	Tr/mn
<b>Glissement</b>	4.66	%
<b>Tension d'alimentation</b>	380	V
<b>Connexion des enroulements</b>	Triangle ( $\Delta$ )	-
<b>Courant absorbé</b>	5.2	A
<b>Facteur de puissance</b>	0.83	-
<b>Rendement</b>	78	%
<b>Résistance d'une phase au stator (26°C)</b>	8.67	$\Omega$
<b>Hauteur d'axe</b>	100	mm
<b>Couple nominale</b>	15	N.m

*Tab.A.2 Dimensions de la carcasse [5]*

<b>Composante</b>	<b>Valeur</b>	<b>Unité</b>
<b>Diamètre extérieur</b>	153	mm
<b>Diamètre intérieur</b>	145	mm
<b>Longueur axiale</b>	192	mm
<b>Nombre d'ailette</b>	40	mm
<b>Hauteur d'ailette</b>	20	mm
<b>Distance entre deux ailettes</b>	10	mm

*Tab.A.3 Dimensions du stator [5]*

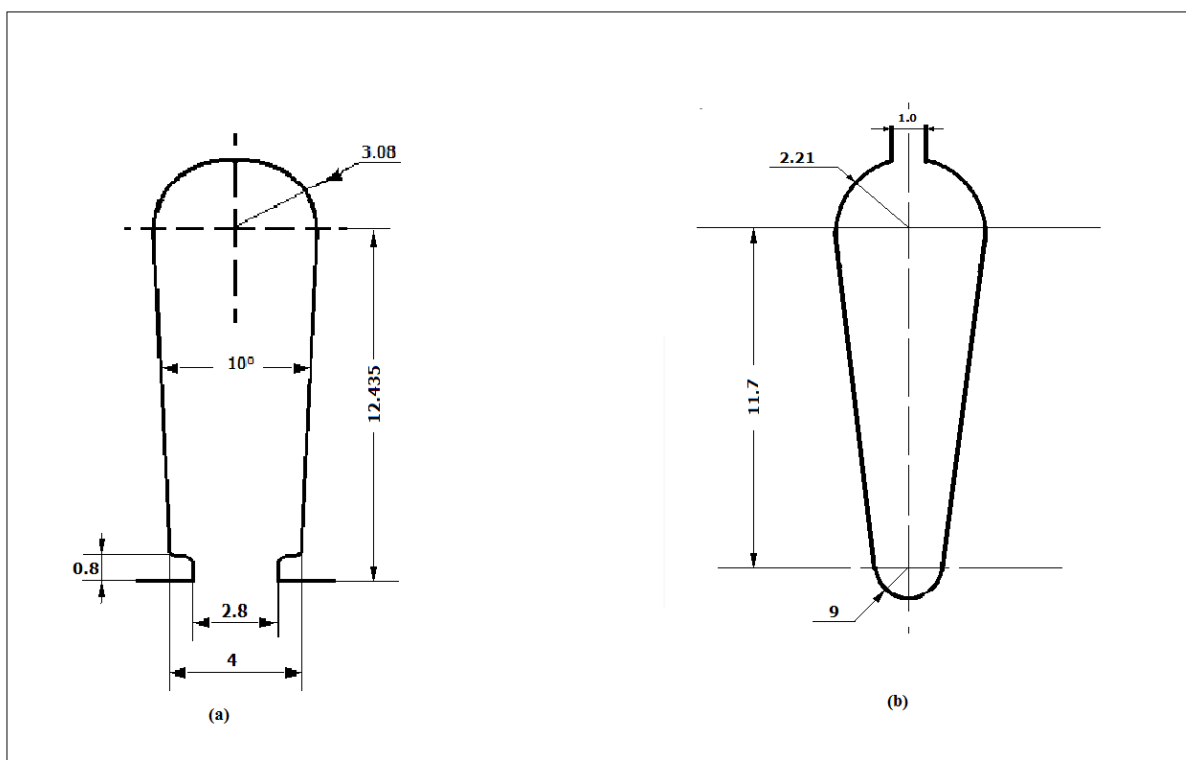
<b>Composante</b>	<b>Valeur</b>	<b>Unité</b>
<b>Diamètre extérieur</b>	145	mm
<b>Diamètre intérieur</b>	88.5	mm
<b>Diamètre intérieur de la culasse</b>	119.53	mm
<b>Longueur axiale</b>	110	mm
<b>Nombre d'encoche</b>	36	-
<b>Section d'encoche</b>	96.4	mm <sup>2</sup>
<b>Epaisseur de caniveau d'encoche</b>	0.225	mm
<b>Nombre de brins actifs par encoche</b>	64	-
<b>Diamètre du conducteur nu</b>	0.71	mm
<b>Diamètre du conducteur isolé</b>	0.753	mm
<b>Section de cuivre dans l'encoche</b>	25.34	mm <sup>2</sup>
<b>Epaisseur de l'entrefer</b>	0.25	mm
<b>Classe d'isolation</b>	F	-

*Tab.A.4 Dimensions du rotor [5]*

<b>Composante</b>	<b>Valeur</b>	<b>Unité</b>
<b>Diamètre extérieur</b>	88	mm
<b>Diamètre extérieur de la culasse</b>	57.75	mm
<b>Diamètre de l'arbre</b>	37	mm
<b>Longueur axiale</b>	110	mm
<b>Nombre d'encoches</b>	28	-
<b>Section de l'encoche</b>	45.33	mm <sup>2</sup>
<b>Biais d'encoche</b>	1	-
<b>Diamètre extérieur de l'anneau de court circuit</b>	86.5	mm
<b>Diamètre intérieur de l'anneau de court circuit</b>	48	mm
<b>Nombre d'ailettes à l'extrémité de l'anneau de court circuit</b>	7	-

Caractéristiques des enroulements :

- 6 bobines triple/moteur.
- 2 bobines en série par phase.
- Nombre de sections totales= 18 sections.
- Nombre de section par phase=6 sections.
- Nombre de bobines totales = 6 bobines.
- Nombre de bobine par phase= 2 bobines.
- 64 conducteurs par encoche. [5]



**Fig.A.1** Dimensions des Encoches [5]

(a) Encoches statoriques, (b) Encoches rotoriques.

# Annexe A : Caractéristiques et dimensions de la machine asynchrone étudiée et du variateur de fréquence

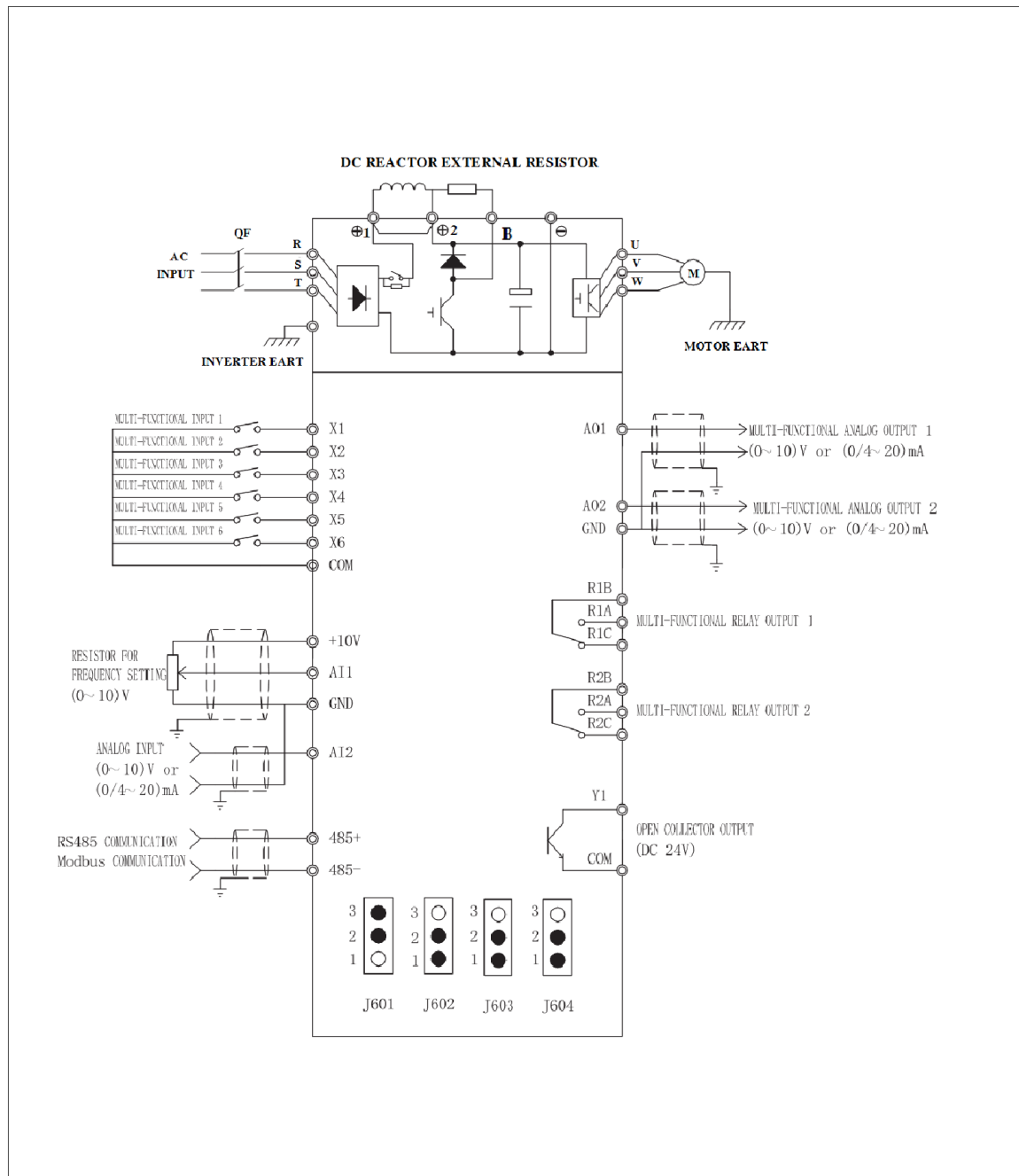


Fig.A.2 Schéma fonctionnel du variateur fourni par le constructeur [16]

**I Calcul des pertes dans les différentes parties de la machine****I.1 Calcul des pertes joules statoriques****I.1.1 En charge nominale avec une alimentation sinusoïdale à 50Hz**

$$P_{JS} = 3 \cdot R_{S(115^\circ)} \cdot I^2$$

$$R_{S(115^\circ)} = R_{S(26^\circ)} \cdot \frac{115 + 235}{26 + 235} = 8,67.1,34 = 11,62\Omega$$

$$P_{JS} = 3 \cdot 11,62 \cdot \left(\frac{5,01}{\sqrt{3}}\right)^2 = 291,66W$$

**I.1.2 En charge nominale avec une alimentation non sinusoïdale à 50Hz**

$$P_{JS} = 3 \cdot R_{S(117,9^\circ)} \cdot I^2$$

$$R_{S(117,9^\circ)} = R_{S(26^\circ)} \cdot \frac{117,9 + 235}{26 + 235} = 8,67.1,35 = 11,72\Omega$$

$$P_{JS} = 3 \cdot 11,72 \cdot \left(\frac{5,1}{\sqrt{3}}\right)^2 = 304,9W$$

**I.1.3 A vide avec une alimentation sinusoïdale à 50 Hz**

$$P_{JS0} = 3 \cdot R_{S(60,4^\circ)} \cdot I_0^2$$

$$R_{S(60,4^\circ)} = R_{S(26^\circ)} \cdot \frac{60,4 + 235}{26 + 235} = 8,67.1,13 = 9,81\Omega$$

$$P_{JS0} = 3 \cdot 9,81 \cdot \left(\frac{3}{\sqrt{3}}\right)^2 = 88,31W$$

**I.1.4 A vide avec une alimentation non sinusoïdale à 50 Hz**

$$P_{JS0} = 3 \cdot R_{S(64,2^\circ)} \cdot I_0^2$$

$$R_{S(64,2^\circ)} = R_{S(26^\circ)} \cdot \frac{64,2 + 235}{26 + 235} = 8,67.1,14 = 9,93\Omega$$

$$P_{JS0} = 3 \cdot 9,93 \cdot \left(\frac{3,6}{\sqrt{3}}\right)^2 = 128,8W$$

**I.1.5 A vide avec une alimentation non sinusoïdale à 30 Hz**

$$P_{JS0} = 3 \cdot R_{S(58,7^\circ)} \cdot I_0^2$$

$$R_{S(58,7^\circ)} = R_{S(26^\circ)} \cdot \frac{58,7 + 235}{26 + 235} = 8,67.1,12 = 9,75\Omega$$

$$P_{JS0} = 3.9,75 \cdot \left(\frac{3,65}{\sqrt{3}}\right)^2 = 129,89W$$

### I.1.6 A vide avec une alimentation non sinusoïdale à 10 Hz

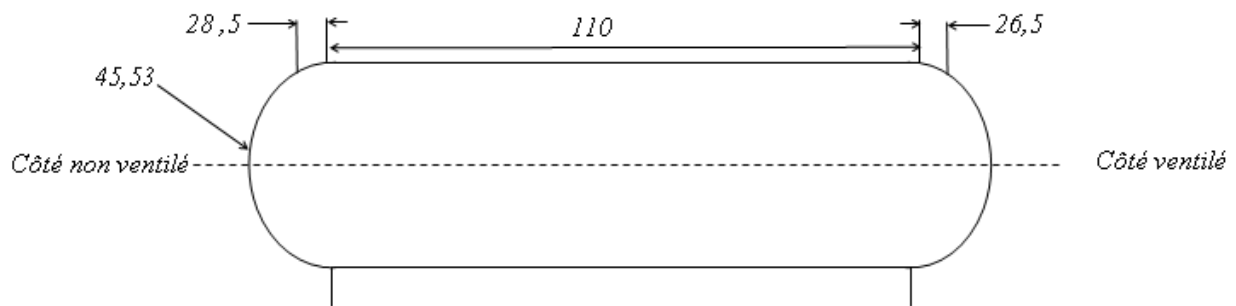
$$P_{JS0} = 3 \cdot R_{S(44.5^\circ)} \cdot I_0^2$$

$$R_{S(44.5^\circ)} = R_{S(26^\circ)} \cdot \frac{44,5 + 235}{26 + 235} = 8,67.1,07 = 9,28\Omega$$

$$P_{JS0} = 3.9,28 \cdot \left(\frac{3,4}{\sqrt{3}}\right)^2 = 107,32W$$

### I.2 Séparations des pertes joules dans le bobinage statorique

Les pertes joules statoriques se situent dans les têtes de bobines et l'enroulement dans les encoches.



**Fig.B.1** Dimensions des têtes de bobine.

La longueur moyenne d'une tête de bobine se calcule à partir de cette formule :

➤ **Côté non ventilé**

$$L_{bnv} = (45,553 \cdot \pi) - (2 \cdot (45,553 - 28,5)) = 109\text{mm}$$

➤ **Côté ventilé**

$$L_{bv} = (45,553 \cdot \pi) - (2 \cdot (45,553 - 26,5)) = 105\text{mm}$$

Ce qui fait que la longueur totale d'un faisceau de conducteur est la suivante

$$L_{tot} = L_{bnv} + L_{bv} + 2 \cdot 110 = 434\text{mm}$$

Les pertes joules dans l'encoche et dans les têtes de bobine sont les suivantes :

➤ **Dans l'encoche statorique**

$$P_{enc} = P_{JS} \cdot (2 \cdot 110 / 434) = 0,507 \cdot P_{JS}$$

➤ **Dans la tête de bobine côté ventilé**

$$P_{bv} = P_{JS} \cdot (2 \cdot 105 / 434) = 0,242 \cdot P_{JS}$$

➤ Dans la tête de bobine côté non ventilé

$$P_{bnv} = P_{JS} * (2*109/434) = 0,251 * P_{JS}$$

Ces pertes sont de valeurs différentes dans les essais à vide et en charge :

➤ A vide avec une alimentation sinusoïdale à 50 Hz

$$P_{enc} = 0,507 * 88.31 = 44,77W$$

$$P_{bv} = 0,242 * 88.31 = 21,37W$$

$$P_{bnv} = 0,251 * 88.31 = 22,17W$$

➤ A vide avec une alimentation non sinusoïdale à 50 Hz

$$P_{enc} = 0,507 * 28.8 = 14,61W$$

$$P_{bv} = 0,242 * 28.8 = 6,97W$$

$$P_{bnv} = 0,251 * 28.8 = 7,24W$$

➤ En charge avec une alimentation sinusoïdale à 50Hz

$$P_{enc} = 0,507 * 291,66 = 147,87W$$

$$P_{bv} = 0,242 * 291,66 = 70,58W$$

$$P_{bnv} = 0,251 * 291,66 = 73,2W$$

➤ En charge avec une alimentation non sinusoïdale à 50Hz

$$P_{enc} = 0,507 * 304,9 = 154,58W$$

$$P_{bv} = 0,242 * 304,9 = 73,78W$$

$$P_{bnv} = 0,251 * 304,9 = 76,53W$$

### I.3 Calcul des pertes fers statoriques

*Tab.B.1* Calcul des pertes joules à partir des différentes grandeurs relevés de l'essai à vide du moteur

<b>U<sup>2</sup>(V)</b>	133225	112225	102400	93636	81796	70756	60516	50625	44100	35344
<b>R(Ω)</b>	9.42	9.44	9.41	9.39	9.36	9.34	9.33	9.3	9.27	9.24
<b>Pj(W)</b>	84.78	51.24	43.09	35.34	28.01	22.72	18.28	15.23	13.12	10.18
<b>Pab(W)</b>	225	175.5	157.5	135	130.5	117	93	87	85.5	69
<b>Pab-Pj(W)</b>	140.22	124.25	114.4	99.65	102.48	94.27	74.71	71.76	72.37	58.81

<b>U<sup>2</sup>(V)</b>	28900	22500	16384	12100	9216	6400	4624	2500	1600	900
<b>R(Ω)</b>	9.21	9.19	9.16	9.15	9.12	9.11	9.08	9.07	9.06	9.05
<b>Pj(W)</b>	8.48	5.3	4.23	4.25	3.73	3.27	3.26	4.44	6.70	14.36
<b>Pab(W)</b>	63	57	57	51	48	46.5	48	51.75	52.5	60
<b>Pab-Pj(W)</b>	54.51	51.69	52.71	46.75	44.27	43.22	44.73	47.30	45.7	45.6

Pour obtenir les pertes fers on devra tracer la courbe de la puissance absorbée-pertes joules à vide en fonction de carré de la tension.

Après avoir tracé la courbe on retrace une droite là où la vitesse est constante, cette droite coupera l'axe des ordonnées dans un point qui représente les pertes mécaniques.

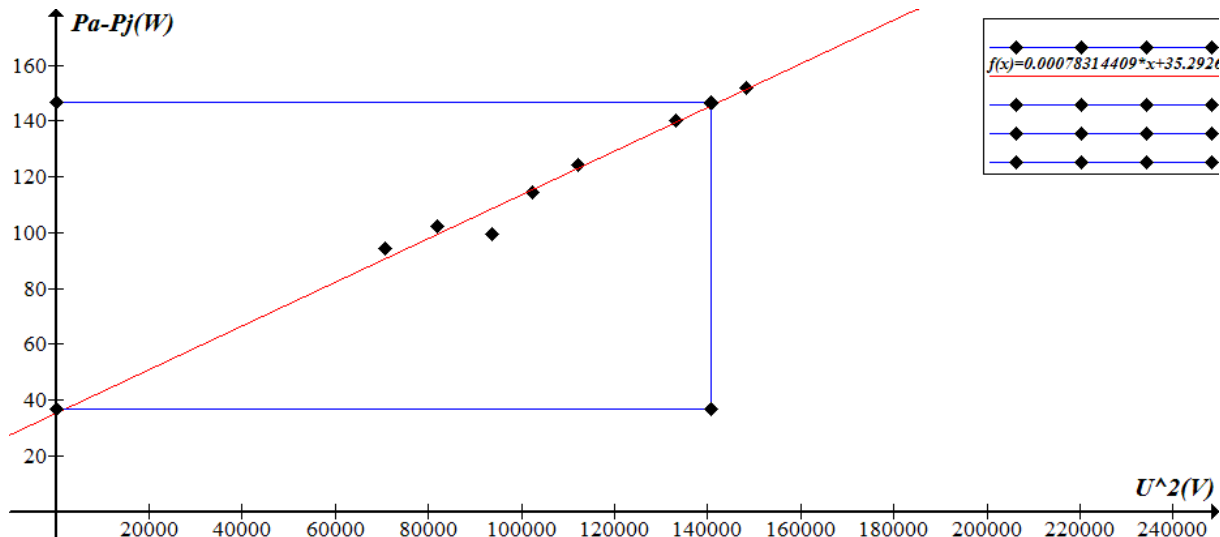


Fig.B.2 déduction des pertes fer à partir de la courbe  $P_a - P_j$  en fonction de  $U^2$

$$P_a - P_j = P_f + P_{mec}$$

$$P_f = P_a - P_j - P_{mec}$$

$$P_f = 147 - 32$$

$$P_f = 115W$$

Cette valeur de perte fer reste constante pour les essais à la fréquence constante.

#### I.4 Calcul des pertes joules rotorique en charge nominale

##### I.4.1 Alimentation sinusoïdale à 50Hz

$$P_{jr} = g * P_{tr}$$

$$g = \frac{N_s - N}{N_s}$$

Avec :

$P_{tr}$  : La puissance transmise au rotor (W).

$g$  : Le glissement.

$N_s$  : La vitesse de champ tournant (Tr/min).

$N$  : La vitesse mécanique (Tr/min).

$$P_{tr} = P_a - (P_{JS} + P_{fer}) = 2529 - (291,66 + 115) = 2122,34W$$

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{1500 - 1414}{1500} = 5.7\%$$

$$P_{jr} = 2122,34 * 0,057 = 120,97W$$

#### I.4.2 Alimentation non sinusoïdale à 50Hz

$$P_{tr} = P_a - (P_{JS} + P_{fer}) = 2700 - (304,9 + 115) = 2216,1W$$

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{1500 - 1430}{1500} = 4,6\%$$

$$P_{jr} = 2216,1 * 0,046 = 101,94W$$

#### I.4.3 Alimentation à vide

Les pertes joules rotoriques dans l'essai à vide sont très minimales (proche de 0), donc on peut les négliger.

$$P_{jr} = 0W$$

#### I.5 Calcul du volume des différents éléments de la machine

##### ➤ Le volume du cuivre au niveau des encoches

$$V_{enc} = 3 * L_{enc} * S_{fil}$$

Avec :

$$L_{enc} = 84,48m$$

$$S_{fil} = 3,96 * 10^{-7} m^2$$

$$V_{enc} = 84,48 * 3,96 * 10^{-7} mm^3 = 1,0036224 * 10^{-4} m^3$$

##### ➤ Volume du cuivre dans les têtes des bobines

$$V_{tb} = L_{tb} * S_{fil}$$

$$V_{tb} = 50,90 * 3,96 * 10^{-7} m^3$$

##### ➤ Le volume des tôles statoriques

Le volume des tôles statoriques = Le volume de cylindre creux du stator - Le volume totale des encoches statoriques.

Afin de calculer le volume de l'encoche statorique, nous l'avons partagé en 3 surfaces :

$$V_1 = \pi * ((D/2)^2 * L) * 1/2 = 1638,3 mm^3$$

$$V_2 = ((a+b)/2) * h * L = 6442,96 mm^3$$

$$V_3 = a * c * L = 277,2 mm^3$$

$$V_{enc} = V_1 + V_2 + V_3$$

$$V_{36enc} = 8358 * 46,36 = 300904,56 \text{ mm}^3$$

➤ **Calcul du volume de cylindre creux**

$$V_{cyl.cre} = \frac{\pi \cdot L \cdot (D_{ext}^2 - D_{int}^2)}{4}$$

$$V_{cyl.cre} = 1139193,963 \text{ mm}^3$$

Alors le volume des tôles statorique est le suivant :

$$V_{ts} = V_{cyl.cre} - V_{36enc}$$

$$V_{ts} = 1139193,963 - 300904,56 = 838289,403 \text{ mm}^3$$

➤ **Le volume de l'Aluminium dans la cage rotorique**

$$V_{Alu} = 2(V_{ann} * V_{tbar})$$

$$V_{Alu} = S_{ann} * L_{tbar} = 45,3267 \text{ mm}^2$$

$$L_{tbar} = \frac{110}{\cos 10^\circ (\text{biais})} = 111,7 \text{ mm}$$

$$V_{bar} = 45,3267 * 11,7 = 5069,99239 \text{ mm}^3$$

$$V_{tbar} = V_{bar} * 28 = 5069,99239 * 28 = 141763,7869 \text{ mm}^3$$

$$V_{ann} = [(\pi * L * (D_{ext}^2 - D_{int}^2))]/4 = [(\pi * 13 * (86^2 - 48^2))]/4$$

$$V_{ann} = 52844,04 \text{ mm}^3$$

$$V_{Alu} = 2 V_{ann} + V_{tbar} = 2 * 52844,04 + 141763,7869 = 247451,8694 \text{ mm}^2$$

## I.6 Calcul des densités de pertes dans les différentes parties du moteur

### I.6.1 En charge nominale à 50hz sinusoïdale

➤ **Calcul des densités de pertes au niveau des encoches**

$$D_{enc} = \frac{P_{jsenc}}{V_{cul}}$$

$$V_{cul} = 3 \cdot S_{fil} \cdot L_{fil}$$

$$D_{enc} = \frac{147,87}{1,0036224 \cdot 10^{-4}}$$

$$D_{enc} = 1473362,89 \text{ W} / \text{m}^3$$

➤ **Calcul des densités des pertes dans les tôles statoriques**

$$D_{TS} = \frac{P_{fer}}{V_{ts}} = \frac{115}{8,38 \cdot 10^{-4}} = 137231,5 \text{ W} / \text{m}^3$$

- Calcul des densités des pertes dans les encoches rotoriques

$$D_{enc} = \frac{P_{jr}}{V_{Alu}}$$

$$V_{Alu} = 2 V_{ann} + V_{tbar}$$

$$D_{enc} = \frac{120,97}{2,47 \cdot 10^{-4}}$$

$$D_{enc} = 486518,21 W / m^3$$

### I.6.2 En charge nominale à 50hz non sinusoïdale

- Calcul des densités de pertes au niveau des encoches

$$D_{enc} = \frac{P_{jsenc}}{V_{cul}}$$

$$V_{cul} = 3 \cdot S_{fil} \cdot L_{fil}$$

$$D_{enc} = \frac{154,58}{1,0036224 \cdot 10^{-4}}$$

$$D_{enc} = 1473362,89 W / m^3$$

- Calcul des densités des pertes dans les tôles statorique

$$D_{TS} = \frac{P_{fer}}{V_{ts}} = \frac{115}{8,38 \cdot 10^{-4}} = 137231,5 W / m^3$$

- Calcul des densités des pertes dans les encoches rotorique

$$D_{enc} = \frac{P_{jr}}{V_{Alu}}$$

$$V_{Alu} = 2 V_{ann} + V_{tbar}$$

$$D_{enc} = \frac{101,94}{2,47 \cdot 10^{-4}}$$

$$D_{enc} = 418623,48 W / m^3$$

### I.6.3A vide avec une alimentation sinusoïdale a 50Hz

- Calcul de la densité de pertes au niveau des encoches

$$D_{enc} = \frac{P_{jenc}}{V_{cul}}$$

$$V_{cul} = 3 \cdot S_{fil} \cdot L_{fil}$$

$$D_{enc} = \frac{44,77}{1,0036224 \cdot 10^{-4}}$$

$$D_{enc} = 446084,10W / m^3$$

- Calcul des densités de pertes dans les tôles statoriques

$$D_{TS} = \frac{P_{fer}}{V_{ts}} = \frac{115}{8,38.10^{-4}} = 137231,5W / m^3$$

- Calcul de densité de pertes dans les encoches rotoriques

$$D_{enr} = 0$$

#### I.6.4.A vide avec une alimentation non sinusoïdale à 50Hz

- Calcul de la densité de pertes au niveau des encoches

$$D_{enc} = \frac{P_{jenc}}{V_{cul}}$$

$$V_{cul} = 3.S_{fil}.L_{fil}$$

$$D_{enc} = \frac{65,3}{1,0036224.10^{-4}}$$

$$D_{enc} = 650643,11W / m^3$$

- Calcul des densités de pertes dans les tôles statoriques

$$D_{TS} = \frac{P_{fer}}{V_{ts}} = \frac{115}{8,38.10^{-4}} = 137231,5W / m^3$$

- Calcul de densité de pertes dans les encoches rotoriques

$$D_{enr} = 0$$

#### I.7 Calcul du couple de charge :

$$Cu = F.D$$

$$Cu = 50.0.3$$

$$Cu = 15 N.m$$

- [1] Sayed-hamid SHAHALAMI, « Filtrage hybride des perturbations harmoniques produites par des systèmes d'entraînement asynchrone à vitesse variable ». Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2001.
- [2] GUY GRELLET, « Pertes dans les machines tournantes ». Technique de l'ingénieur, traité de génie électrique, vol D3450
- [3] M.ABED & W.REBHI, « Modélisation thermique d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil » Mémoire d'ingénieur, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2013.
- [4] H.IFREK & T.HAOUCHINE, « Etude thermique d'un moteur asynchrone à cage ». Mémoire d'ingénieur, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2011.
- [5] N.KECILI, « Etude des pertes et couples pulsatoires dans les machines asynchrones alimentés par des convertisseurs ». Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri Décembre 2009.
- [6] J.CHEAYTANI, « Calcul par éléments finis des pertes supplémentaires dans la motorisation performantes ». Thèse de doctorat, Université Lille1, 2016.
- [7] G.RAKOTONIRIKA, « Modélisation thermique des moteurs asynchrones à cage par la méthode des éléments finis » thèse de doctorat, Université Du Québec à Trois-Rivières, 2011.
- [8] YVES DEBARD, « Méthode des éléments finis thermiques », Master modélisation numérique et réalité virtuelle, Université de MANS.
- [9] N.DAFFEUR, « Modélisation thermique par éléments finis d'un moteur asynchrone à cage », Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.
- [10] THEODORE WILDI, « ELECTROTECHNIQUE », Edition de Boeck université, 3<sup>ème</sup> édition, 2000
- [11] M.BOUHERAOUA, « Contribution à la modélisation thermique d'un moteur asynchrone à cage ». Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri.
- [12] S.BADACHE, « Contribution à la modélisation thermique d'une machine à réluctance variable à double saillance MRV6/4 par éléments finis en 2D et 3D ». Thèse de doctorat, Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf. 2015/2016.
- [13] D.BOUDEMAGH, « Synthèse et étude des matériaux thermoélectriques du système  $Mg_2SI_{1-x}SN_x$  ». Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2010.
- [14] David Merker, « Finite Element Method Magnetic ». Version 4.2, 2007.
- [15] JACQUES-OLIVIER FAVREAU, « Mesure des températures des surfaces par thermométrie de contact », Pôle mesures et instrumentation de CETIAT, Octobre 2015.
- [16] Instruction manuel, « NVF2G SERIRS INVERTER ». STANDARD : GB/T 12668.2.

## Résumé

Ce travail est consacré à la modélisation et mesure thermique d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil sous différentes sources d'alimentation. Dans une première étape, les différentes pertes, les modes de transferts de la chaleur, méthodes d'études thermique, et moyens de mesure de la température dans une machine électrique sont présentés. Notre objectif est d'étudier le processus d'échauffements et le comportement thermique d'un moteur asynchrone de petite puissance avec le bobinage monté en triangle sous une tension nominale de 380 V avec deux types d'alimentation électrique, une alimentation directe au réseau électrique de fréquence fixe et un convertisseur statique de fréquence. Pour mener cette étude et pour élaborer un modèle thermique d'un moteur asynchrone à cage, l'analyse par la méthode des éléments finis a été adoptée en utilisant le logiciel FEMM et les résultats obtenus sont validés par des essais expérimentaux.

**Mots clés :** moteur asynchrone à cage, transfert de chaleur, études thermiques, méthode des éléments finis, mesure de température.