

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou



Faculté de génie électrique et de l'informatique
Département d'électrotechnique

Mémoire

De fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de master académique
En électrotechnique

Option: Machines Electriques

Thème

**Etude expérimentale du
comportement thermique d'un
moteur asynchrone fermé
auto-ventilé**

Proposé par :

M^r : N. BENAMROUCHE

Réalisé par :

M^{elle} : M. BELMOKDAD

M^{elle} : S. BERRAH

Dirigé par:

M^r : N. BENAMROUCHE

M^r : R. KHALDI

Promotion 2012/2013

Remerciements

Au terme de ce mémoire, nous remercions le Dieu le miséricordieux de nous avoir donné le courage et la patience pour mener au bout ce modeste travail.

Egalement nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur M^f N.BENAMROUCHE, professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, qui nous a fait l'honneur de nous prendre sous sa responsabilité, ainsi que pour ces orientations et précieux conseils, qu'il trouve ici toutes les expressions de notre respect et gratitude.

Nous ne manquerons pas de remercier chaleureusement M^f R. KHALDI, maître assistant à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou qui nous a orienté et conseillé durant la réalisation de ce travail, qui on n'aurait certainement pas réussi sans sa large contribution, son sérieux, son efficacité et sa rigueur.

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

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

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

- *A la mémoire de mon père, qu'il repose en paix.*
- *A ma très très chère mère pour qui je prie DIEU de lui accorder santé et longue vie.*
- *A mes chers frères.*
- *A ma très chère sœur Djouher.*
- *A mon très cher frère Achène.*
- *A ma sœur Nadia et sa famille.*
- *A mes neveux et nièces surtout Abdou et Maylesse.*
- *A toutes ma famille.*
- *A mes amis(es) et secours Djamila, Sara et Hakim.*
- *A toutes mes amis(es) de prés comme de loin.*
- *A mon binôme et sa famille.*
- *A la promotion d'E.T.H 2012-2013.*

M.BELMOKDAD

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

- Spécialement à ma très chère mère qui nous a quittés, et qu'elle repose en paix.
- Mes parents pour qui je prie DIEU de leurs accorder santé et longue vie. et je les remercie de m'avoir guidé tout le long chemin.
- Mon cher mari Aziz pour son soutien et son encouragement tout au long de ce travail et sa famille.
- Mes chers frères (Cherif, Ali) et leurs femmes (Hamida, Fatima).
- Mon petit frère Massinissa.
- Mes chères sœurs (Rosa et son mari) et Kathia notre benjamine.
- Mon très cher neveu Aghiles.
- Mes oncles et tantes.
- Ma chère binôme et toute sa famille.
- Toutes mes amies.
- A tous les enseignants qui ont contribué à ma formation, tous cycles confondus, chacun en son nom.

S. BERRAH



SOMMAIRE

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I : Différentes pertes dans un moteur asynchrone	
I.1. Introduction	3
I.2. Pertes dans le circuit électrique	3
I.2.1. pertes par effet Joule au stator	3
I.2.2. Pertes par effet Joule au rotor	4
I.3. Pertes mécaniques	5
I.3.1. Pertes par frottement	5
I.3.2. Pertes par ventilation	5
I.4. Pertes dans le circuit magnétique	6
I.4.1. Pertes par hystérésis	6
I.4.2. Pertes par courant de Foucault	7
I.5. Pertes supplémentaires	7
I.6. Conclusion	11
Chapitre II : Modes de transferts de chaleur dans une machine asynchrone	
II.1. Introduction	12
II.2. Les différents modes de transfert de chaleur	12
II.2.1. Transfert de chaleur par conduction	12
II.2.1.1. Conductivité thermique	13
II.2.1.2. Conductivité thermique des solides hétérogènes	13
II.2.1.3. Résistance thermique de contact	17
II.2.2. Transfert de chaleur par convection	18
II.2.2.1 Calcul du coefficient d'échanges h	19
II.3. le rayonnement thermique	22
II.4 Application a la machine étudiée	22
II.5 Conclusion	25
Chapitre III : Différentes méthodes de la modélisation thermique	
III.1. Introduction	26
III.2. Méthodes théoriques	26
III.2.1. Méthodes empiriques	26
III.2.2. Méthodes nodales	27
III.2.3. Méthodes numériques	31
III.2.3.1 Méthode des différences finis	31
III.2.3.2 Méthode des éléments finis	31
III.2.3.2.1 Etape de résolution	32

III.3. Méthodes expérimentales	33
III.3.1. Méthode calorimétrique	33
III.3.2. Mesure de température par des capteurs	34
III.3.2.1. Les thermocouples	34
III.3.2.1.a. Définition	34
III.3.2.1.b. Principe de mesure de température par un thermocouple	
III.3.2.1.c. Avantages et inconvénients des thermocouples	35
III.3.2.2 La thermistance	35
III.3.2.2.a. Définition	35
III.3.2.2.b. Principe de mesure de température par des	36
III.3.3. La caméra thermique	37
III.3.4. Avantages et inconvénients de la caméra thermique	37
III.4. Conclusion	38

Chapitre IV : Etude expérimentale et interprétation des résultats

IV.1. Introduction	39
IV.2. Présentation du moteur étudié	39
IV.3. Description du banc d'essai	39
VI.3.1. Photographie et schéma du banc d'essai	40
IV.4. Description de l'enregistreur de température	41
IV.4.1. Définition	41
IV.4.2. Alimentation	41
IV.5. Choix de l'emplacement des thermocouples	43
IV.6. Présentations de la Caméra infrarouge C.A 1879	44
IV. 6.1. Présentation du menu principal	45
IV. 6.2. Mesure de la température	45
IV. 6.3. Fusion des images visuelle et thermique	46
IV. 6.4. Environnement	46
IV.7. Différents essais expérimentaux effectués sur le moteur	47
IV.8. Présentation des résultats des essais effectués	47
IV.8.1. Essai à vide	47
IV.8.1.1. Observations	50
IV.8.2. Essai du moteur en charge nominale	50
IV.8.3. Essai en demi-charge nominale	54
IV.8.3.1. Observations	56
IV.8. Interprétation des résultats	56
IV.9. Conclusion	58
Conclusion générale	59

Résumé :

Notre travail concerne l'étude du comportement thermique d'un moteur asynchrone à cage de faible puissance (2.2kW), totalement fermé auto-ventilé (TEFC : Totally enclosed fan cooled) en utilisant l'approche expérimentale pour différents régimes de fonctionnement du moteur (sans charge, demi-charge et charge nominale). L'objectif assigné est de donner la distribution de température c'est-à-dire, une carte thermique dans le moteur en utilisant plusieurs thermocouples placés dans des endroits stratégiques et puis en essayant une nouvelle méthode à savoir l'utilisation d'une caméra thermique.

Les résultats expérimentaux obtenus montrent que les têtes de bobine côté non ventilé sont les plus sensibles aux élévations de température. Ceci n'est pas concordant avec les résultats publiés dans la littérature spécialisée qui considère le rotor comme étant la partie la plus chaude du moteur « hot spot ». Cette anomalie a été interprétée par le trou percé dans le flasque qui a complètement altéré la carte thermique du moteur.

la nouvelle technique de mesure de température (la caméra thermique) qu'on a expérimentée dans ce mémoire ne permet pas de donner des informations sur la répartition des températures à l'intérieure du moteur ce qui limite considérablement l'intérêt de son utilisation dans l'étude thermique des machines électriques laissant encore le champ ouvert à d'autres investigations surtout pour la distribution de la température au rotor qui représente le point le plus chaud de la machine.

Mots clés :

Le moteur asynchrone, l'expérimental, la caméra thermique, les thermocouples, la chaleur.



**INTRODUCTION
GENERALE**

La machine asynchrone est la machine la plus utilisée dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de sa facilité de mise en œuvre, sa simplicité de construction, son bon rendement et de son excellente fiabilité. De plus, le fonctionnement à vitesse variable est de plus en plus demandé avec des performances plus sévères. Ceci est rendu possible grâce au développement de l'électronique de puissance et de la micro-informatique.

La vitesse variable est obtenue par l'association de convertisseurs statiques aux machines asynchrones. Cette association s'accompagne d'une baisse du rendement provenant des contenus harmoniques générés par les convertisseurs statiques, ceci provoque une augmentation des pertes dans la machine asynchrone.

Cet accroissement de pertes se traduit sous forme d'échauffements supplémentaires des machines électriques les obligeant parfois à travailler dans leurs limites thermiques. De ce fait, il peut en résulter une dégradation de l'isolation de l'enroulement statorique ou la distorsion de la structure rotorique. Le problème de refroidissement ou de la détermination des pertes et de l'échauffement dans la machine asynchrone est ainsi posé.

L'étude du comportement thermique de la machine asynchrone a de tout temps fait une préoccupation majeure tant que pour les constructeurs que pour les utilisateurs. Cette étude est devenue de plus en plus nécessaire car c'est les contraintes thermiques qui fixent les limites de fonctionnement des machines électriques en général et des machines asynchrones en particulier. C'est dans ce contexte que la modélisation thermique prend toute son importance. Cette modélisation est basée sur des méthodes de résolution analytiques ou numériques, qui ont toujours besoin d'une association de méthodes expérimentales afin de corriger et valider les résultats théoriques.

Le travail qui nous a été confié concerne l'étude du comportement thermique d'un moteur asynchrone à cage de faible puissance (2.2kW), totalement fermé auto-ventilé (TEFC : Totally enclosed fan cooled) en utilisant l'approche expérimentale pour différents régimes de fonctionnement du moteur (sans charge, demi-charge et charge nominale). L'objectif assigné est de donner la distribution de température c'est-à-dire, une carte thermique dans le moteur en utilisant plusieurs thermocouples placés dans des endroits stratégiques et puis en essayant une nouvelle méthode à savoir l'utilisation d'une caméra thermique.

A cet effet, nous avons organisé notre mémoire comme suit :

- Nous allons présenter dans un premier chapitre les différentes pertes dans un moteur asynchrone. Leur connaissance et leur localisation sont primordiales pour le développement d'un modèle thermique car elles représentent les sources de chaleur.
- Le deuxième chapitre concerne une présentation des généralités sur les différents types de transfert de chaleur existants dans une machine électrique.

- Le troisième chapitre présente un état de l'art sur les différentes méthodes de modélisation thermique existant dans la littérature spécialisée.
- Le quatrième chapitre représente la partie essentielle du travail qui consiste en la comparaison entre les deux méthodes de mesure de température à savoir l'utilisation des thermocouples et l'utilisation d'une caméra thermique.

Enfin, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume les principaux enseignements émanant des différents essais d'échauffements effectués sur le moteur étudié.

Chapitre I

Différentes pertes dans un moteur asynchrone à cage

I.1. Introduction

Les moteurs et les génératrices électriques sont des machines qui convertissent l'énergie électrique en mécanique et vice versa. Durant le processus de conversion, une partie de cette énergie est dissipée dans les différentes parties de la machine sous forme de chaleur.

Les causes et la distribution des pertes dans les machines électriques tournantes sont complexes, ce qui exige une étude très approfondie ceci est dû principalement au fait que : Le champ magnétique et le courant électrique, qui sont les principales causes de pertes, ont une distribution assez complexe à tel point qu'il est difficile de les localiser [4].

L'échauffement de la machine et son refroidissement se font de manière très complexe car les parties actives de la machine sont constituées d'une suite de conducteurs et d'isolants et de matériaux dont les conductivités thermiques sont différentes suivant la direction de l'échauffement et de diffusion de la chaleur.

Vu ces complexités, plusieurs classifications ont été adoptées, donc ces pertes peuvent être classées comme suit :

- Pertes dans le circuit électrique
- Pertes mécaniques
- Pertes dans le circuit magnétique
- Pertes supplémentaires

Ce chapitre est consacré à l'étude de ces pertes et leurs classifications dans un moteur asynchrone à cage.

I.2. Pertes dans le circuit électrique

Ce sont les pertes par effet Joule dans toutes les parties conductrices d'une machine traversée par des courants (enroulements statoriques et cage rotorique), elles peuvent être obtenues précisément par des calculs théoriques connaissant la résistance et le courant ou par des essais pratiques.

I.2.1. pertes par effet Joule au stator

Ce sont des pertes électriques dissipées par effet Joule dans les enroulements statoriques, elles varient en fonction du carré des courants dans ces enroulements.

En étoile :

$$P_{js} = 3 r I^2 \quad [W] \quad (\text{I.1})$$

Avec :

r : résistance d'une phase statorique [Ω]

I : la valeur efficace du courant traversant l'enroulement statorique [A]

En triangle :

$$P_{js} = 3 r J^2 \quad [W] \quad (I.2)$$

J : courant d'une phase statorique

I.2.2. Pertes par effet Joule au rotor

Les pertes Joule au rotor sont fonctions de la puissance transmise à celui-ci.

$$P_{jr} = m_2 \cdot r_2 \cdot I_2^2 \quad [W] \quad (I.3)$$

m_2 : nombre de barre.

r_2 : Résistance d'une phase rotorique [Ω]

I_2 : Le courant dans la phase [A]

On peut par ailleurs montrer qu'elles sont aussi fonctions du glissement. En effet, les grandeurs P_{jr} et P_{tr} sont liées par la relation.

$$P_{jr} = g \cdot P_{tr} \quad (I.4)$$

Ou bien :

$$P_{jr} = 3 \cdot r_2 \cdot I_2^2 \quad (I.5)$$

Avec:

P_{jr} : Pertes Joule au rotor [W]

r_2 : Résistance d'un enroulement rotorique [Ω]

I_2 : Le courant traversant l'enroulement rotorique [A]

g : glissement

P_{tr} : puissance transmise au rotor à travers l'entrefer en [W]

I.3. Pertes mécaniques [12], [15]

Le refroidissement naturel dans une machine électrique n'est pas suffisant, pour cela, on fait appel à un refroidissement forcé, ce dernier est assuré par un ventilateur monté en bout de l'arbre de la machine. La puissance absorbée par le ventilateur représente les pertes par ventilation et les pertes dues au frottement sont engendrées par la résistance au mouvement à l'intérieur des paliers.

Les pertes mécaniques regroupent les pertes par frottement et par ventilation qui sont en réalité inséparables car elles sont associées à la rotation. Cependant, aux basses vitesses, les pertes par ventilation sont faibles et les pertes par frottement sont estimables.

I.3.1. Pertes par frottement

Ce sont toutes les pertes causées par frottement et qui sont dus à la rotation de la partie tournante de la machine, que ce soit entre solides ou entre solides et fluides.

L'évaluation de ces pertes peut être effectuée par l'utilisation de formules issues de l'expérience et souvent proposée par les constructeurs de roulements. Le couple de frottement dans les roulements est donné par la formule suivante [11] :

$$C_f = K_r R_r F_r \quad (\text{I.6})$$

Avec :

C_f : couple de frottement dans les roulements [N.m]

F_r : Charge radiale transmise [N]

K_r : Coefficient variant selon le type de roulement

R_r : Rayon moyen du roulement [m]

I.3.2. Pertes par ventilation

C'est la puissance absorbée par le ventilateur monté au bout d'arbre de la machine qui est utilisé pour le refroidissement forcé dans la machine.

Elles sont localisées à l'intérieur de la carcasse où l'air est brassé, ce qui génère une résistance mécanique. La détermination de ces pertes est basée sur l'utilisation des résultats de mesures effectuées sur de nombreuses machines, présentés sous forme d'abaques en fonction de la vitesse et de la puissance utile ou sous forme d'expressions approchées. A titre d'exemple la formule suivante donne un ordre de grandeur des pertes par ventilation [10]:

$$P_v = 0.3 \text{ à } 0.7 (P_u V_t^2 10^{-5}) \quad [\text{W}] \quad (\text{I.7})$$

Avec :

P_u : puissance utile de la machine [W]

V_t : vitesse tangentielle du rotor [m/s]

I.4. Pertes dans le circuit magnétique

Elles sont localisées dans les circuits magnétiques du moteur subissant des variations du flux. Elles sont aussi appelées pertes fer du fait que les matériaux constituant ces circuits sont, habituellement, à base de fer. Ces pertes sont proportionnelles au volume du matériau magnétique. On distingue deux types principaux de pertes fer : les pertes par courant de Foucault et les pertes par hystérésis.

I.4.1. Pertes par hystérésis

Le fer se sature et décrit le cycle d'hystérésis avec une fréquence égale à la fréquence imposée par le champ d'excitation, celui-ci conduit à une perte d'énergie et à un échauffement du fer, il s'agit des pertes par hystérésis, proportionnelles à la fréquence et à une certaine puissance de l'amplitude B_m de l'induction. Elles sont aussi liées à la structure du matériau utilisé [13].

$$P_{\text{hyst}} = K_1 f B_m^2 \quad [\text{W/kg}] \quad (\text{I.8})$$

Avec :

K_1 : constante

B_m : induction maximale dans l'entrefer [T]

Aussi elles sont proportionnelles à l'aire du cycle d'hystérésis, au nombre de cycles d'aimantation et sont indépendantes de l'épaisseur de la tôle. Pour un volume V d'un matériau soumis au champ H et à une induction B sur une période τ , les pertes par hystérésis peuvent se mettre sous la forme [10]:

$$P_{\text{hyst}} = \int_V \left(\frac{1}{\tau} \int H \cdot dB \right) dV \quad (\text{I.9})$$

I.4.2. Pertes par courant de Foucault

Les pertes par courants de Foucault résultent des variations temporelles des flux dans leurs masses induisant des f.e.m qui donnent naissance à des courants qui se ferment dans la masse du fer, elles sont proportionnelles au carré de la fréquence et de l'induction magnétique maximale.

$$P_{FC} = K_2 f^2 B_m^2 \quad [W/kg] \quad (\text{I.10})$$

Avec :

K_2 : est une constante

B_m : Induction maximale dans l'entrefer [T]

f : fréquence du réseau [Hz]

I.5. Pertes supplémentaires

Ce sont les pertes dues à tous les phénomènes parasites, en particulier celles qui correspondent aux flux de fuites, à la fréquence fondamentale et harmonique.

La détermination de ces pertes est un problème aigu, cependant elles peuvent être exprimées sous forme mathématique et en fonction des autres pertes comme suit: [3], [14]

$$P_{sup} = P_T - (P_{js} + P_{jr} + P_{mec} + P_{fer}) \quad [W] \quad (\text{I.11})$$

Avec :

P_T : puissance totale absorbée [W]

P_{js} : pertes Joule statorique [W]

P_{jr} : pertes Joule rotorique [W]

P_{mec} : pertes mécaniques [W]

P_{fer} : pertes fer [W]

Il est important de souligner qu'au niveau des normes, il n'existe pas de liste standard portant sur les pertes supplémentaires. Dans cette étude, sont en particulier discutées les causes de l'apparition des supplémentaires, en se basant sur cette étude et sur certaines références [12, 14, 16], on peut inclure et subdiviser les pertes supplémentaires en six composantes :

I.5.1. Pertes dues au flux de fuites d'encoches

Ce flux est causé par la création de courants de Foucault, à la distribution résultante de la résistance (effet de peau) du conducteur du stator et dans la cage rotorique. Ce qui majore les pertes par effet joule évaluées par la mesure des résistances à faible fréquence.

I.5.2. Pertes dues aux flux de fuites dans les parties frontales du bobinage

Ce sont les pertes par courants de Foucault induites dans les plaques de serrage, les tôles d'extrémités, une partie de la culasse, les flasques, le cuivre des conducteurs statorique et dans les anneaux du rotor. [15]

I.5.3. Pertes dues aux flux de fuites d'inclinaison des encoches

L'inclinaison des encoches du rotor a pour effet de déphaser dans l'espace les forces magnétomotrices du stator et du rotor, mais elle introduit en même temps des pertes entre les barres et le fer rotorique.

I.5.4. Pertes dues au flux de fuites zigzag

Ces pertes sont créées au droit de chaque encoche par localisation de la force magnétomotrice. Ces pertes se situent à la surface des dents du stator et du rotor ainsi que dans la cage du rotor. Les pertes dans le cuivre du stator, induites par ce flux sont négligeables.

I.5.5. Pertes dues au flux de fuite de répartition de phase

Les phases entraînent une distribution de la force magnétomotrice (f.m.m) dans l'entrefer qui diffère de la répartition sinusoïdale, cela engendre un flux de fuite de répartition des phases qui produit des pertes dans les conducteurs du rotor.

Il faut remarquer que les flux d'encoche, dus aux pulsations de perméances et de force magnétomotrice, ont la même fréquence et se combinent vectoriellement dans l'entrefer.

I.5.6. Pertes surfaciques [7]

- pertes dues aux harmoniques de perméance

Si l'on suppose la force magnétomotrice sinusoïdale, les discontinuités périphériques dues à l'encochage et aux épanouissements polaires entraînant des variations périodiques de la réductance de cet entrefer, introduisent ainsi une modulation à fréquence élevée du flux ; il en résulte des pertes à la surface du fer et des pertes par pulsation dans les dents. Ces pertes dépendent essentiellement du rapport ouverture d'encoche sur l'entrefer.

- **pertes parasites à fréquence harmonique**

En dehors des pertes fer produites par le flux fondamental, il en existe d'autres créées par les variations beaucoup plus rapides de l'induction : ce sont les pertes fer supplémentaires. Ces pertes sont dues essentiellement à deux causes : les variations de la perméance de l'entrefer et la déformation de la force magnétomotrice.

- **pertes dues aux harmoniques de force magnétomotrice**

Ce sont des harmoniques dus aux encoches et à la répartition des phases. Les pertes créées par ces harmoniques sont proportionnelles au carré du courant du stator.

Vu la complexité de ces pertes supplémentaires, les standards des pays comme l'ex U.R.S.S. la Grande-Bretagne, et la commission électrotechnique internationale [C.E.I], estiment que ces pertes supplémentaires sont égales à 0.5% de la puissance de la machine, par contre le standard américain les estime à 1.2% pour les petites machines et 0.9% pour les autres machines [8].

Les différents types de pertes dans la machine asynchrone sont illustrés dans la figure (**fig.I.1**)

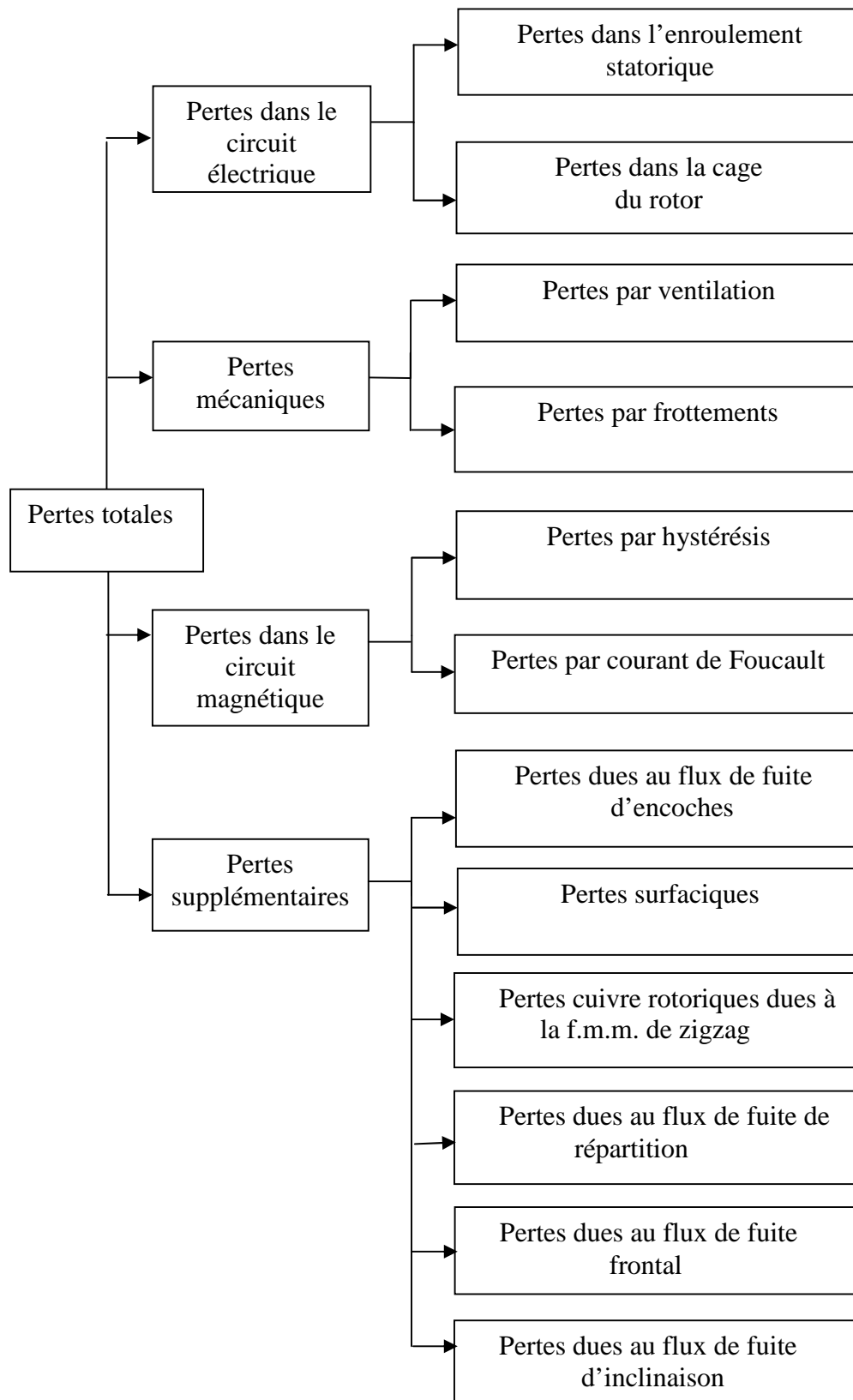


Fig. I.1. Différentes pertes dans une machine asynchrone

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents composants des pertes dans une machine asynchrone. Nous avons aussi relevé la complexité de les classer, d'identifier et même de définir les pertes supplémentaires en charge.

La connaissance exacte de la nature des pertes et de leurs distributions est indispensable avant toute étude thermique de la machine électrique tournante.

En effet, ces pertes représentent les sources de chaleurs qui se manifestent sous forme d'élévation de température et qui se transmettent entre les différentes parties internes de la machine et aussi vers le milieu environnant.

Dans le prochain chapitre on va aborder l'étude des différents modes de transfert de chaleur existant dans une machine asynchrone.

Chapitre II

Modes de transferts de chaleur dans les machines asynchrones

II.1. Introduction

La conversion de l'énergie électromécanique dans les machines électriques s'accompagne de pertes (électromagnétique et mécanique) qui se transforment en énergie calorifique. Ceci se traduit par des élévations de température à l'intérieur de la machine. Le transfert de chaleur se fait essentiellement par conduction thermique des parties actives internes vers le milieu ambiant où la chaleur est cédée par convection et rayonnement.

L'échauffement de la machine est d'autant plus important, quand l'aptitude de la machine à céder de la chaleur vers l'extérieur est plus faible. Pour réduire son importance, il est nécessaire d'installer des systèmes de refroidissement efficaces pour faciliter les échanges thermiques [3].

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

II.2. Les différents modes de transfert de chaleur

Le transfert thermique s'effectue selon trois processus:

- Conduction thermique ;
- Convection thermique ;
- Rayonnement thermique.

II.2.1. Transfert de chaleur par conduction

La conduction thermique est un transfert de chaleur à travers deux corps solides (fer, cuivre et solides) sans déplacement de matière. Cette chaleur se propage suivant des lignes de flux normales à des surfaces isothermes.

La loi fondamentale de la conduction thermique a été énoncée par Fourier, elle permet de relier la densité du flux de chaleur au gradient de température :

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

Avec :

$\vec{\varphi}$: Densité du flux de chaleur [W/m²]

λ : Conductivité thermique [W/m°C]

T : température [°C]

II.2.1.1. Conductivité thermique

La conductivité thermique appelée aussi coefficient de conduction thermique est une propriété liée à la structure physico-chimique de la matière (solide, liquide ou gaz) [5].

Elle représente une grandeur thermo-physique importante caractéristique pour chaque substance, qui joue un rôle extrêmement important pour le transfert thermique [13].

La conductivité thermique définit la nature du matériau conducteur ou isolant. En effet, plus la valeur de la conductivité thermique est importante, plus le matériau est bon conducteur de la chaleur. Les solides sont généralement plus conducteurs de chaleur par rapport aux liquides [14]. La conductivité thermique des gaz est souvent très faible. La valeur de la conductivité thermique dépend essentiellement de la nature du matériau et de la température.

Dans de nombreux cas pratiques, lorsque les écarts de température ne sont pas trop élevés, on peut considérer avec une précision suffisante λ comme une constante pour un milieu donné.

Le signe (–) de la relation de Fourier (II.1) traduit le fait que l'échange de chaleur se fait du corps chaud vers le corps froid.

A partir de la loi de Fourier, on peut définir la conductivité thermique par la relation qui permet de saisir sa signification physique :

$$\lambda = \frac{\overrightarrow{\varphi}}{\overrightarrow{gradT}} \quad [\text{W}/(\text{m}^\circ\text{C})] \quad (\text{II.2})$$

Elle représente du point de vue numérique l'énergie-chaleur transférée par unité de surface isotherme, dans une unité de temps sous un gradient de température unitaire.

II.2.1.2. Conductivité thermique des solides hétérogènes

- **Notion de résistance thermique**

Considérons un matériau de conductivité λ , d'épaisseur (x) et de section (s) dans la direction de la conduction (**Figure. II.1**).

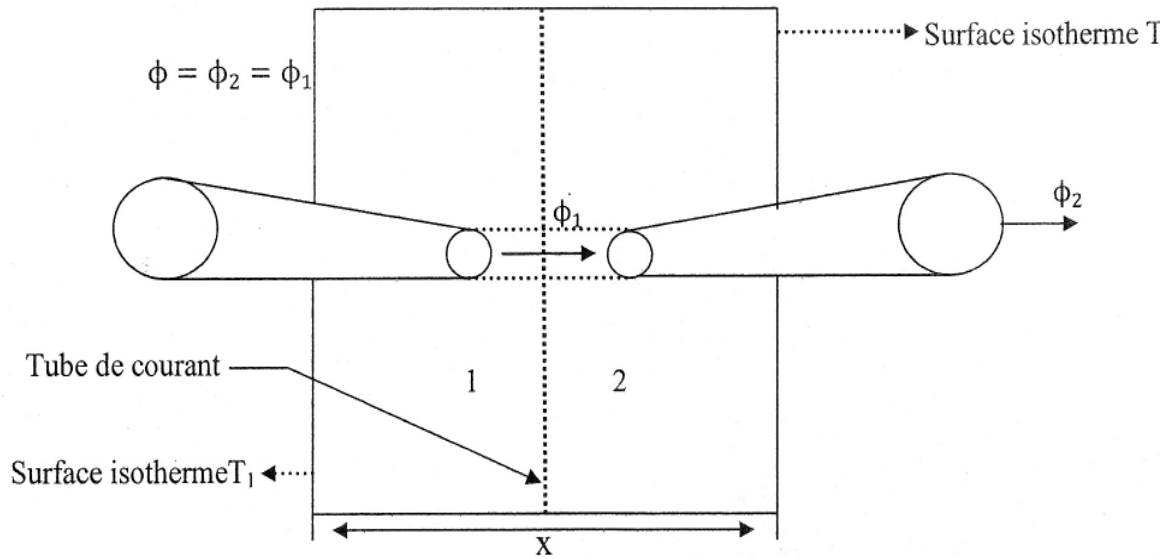


Fig. II.1. Représentation schématique de la résistance thermique dans un circuit thermique

Sachant que la quantité de chaleur transmise par conduction entre deux surfaces égales et parallèles est donnée par la loi de Fourier suivante :

$$\Phi = \frac{\lambda S}{x} (T_1 - T_2) \quad (\text{II.3})$$

Avec :

Φ : Flux d'énergie transmis [W]

S : surface à travers laquelle se propage le flux thermique [m^2]

λ : conductivité thermique [$\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$]

x : distance entre deux surfaces dont les températures sont T_1 et T_2 [m]

Que l'on peut réécrire comme suit :

$$(T_1 - T_2) = \frac{x}{\lambda S} \Phi \quad (\text{II.4})$$

On peut déduire d'après cette relation l'expression de la résistance thermique par analogie avec la loi d'Ohm.

$$R = \frac{x}{\lambda S} = \frac{(T_1 - T_2)}{\Phi} \quad (\text{II.5})$$

Dans le cas des milieux de formes différentes, cette relation peut se généraliser comme suit :

$$R = \frac{x}{\lambda S_{\text{moy}}}$$

Pour un cylindre :

$$S_{\text{moy}} = \frac{(S_2 - S_1)}{\log \frac{S_2}{S_1}} \quad (\text{II.6})$$

S_{moy} : La moyenne logarithmique des surfaces (1) et (2), internes et externes du cylindre.

Pour une sphère :

$$S_{\text{moy}} = \sqrt{S_2 - S_1} \quad (\text{II.7})$$

S_{moy} : La moyenne géométrique des surfaces internes et externes.

Si on considère plusieurs couches (i) de milieu différents mais de formes semblables traversées par un flux de chaleur, on distingue deux cas : association série et association parallèle des résistances thermiques.

- Association série

La conductivité thermique est déduite de la relation suivante :

$$\frac{x}{\lambda_{eq} S} = \sum \frac{x_i}{\lambda_i S_i} \quad (\text{II.8})$$

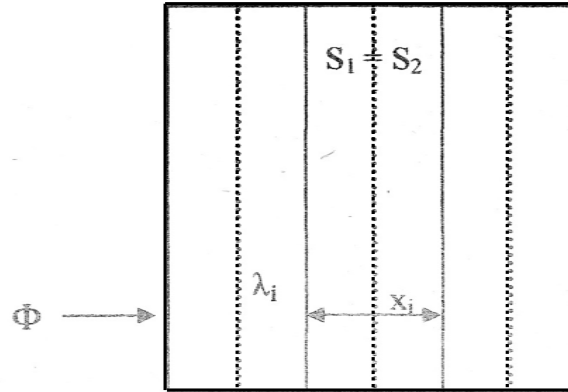


Figure. II.2. Association série.

- Association parallèle

La conductivité thermique est déduite de la relation suivante :

$$\lambda_{eq} \frac{S}{x} = \sum \frac{\lambda_i S_i}{x_i} \quad (\text{II.9})$$

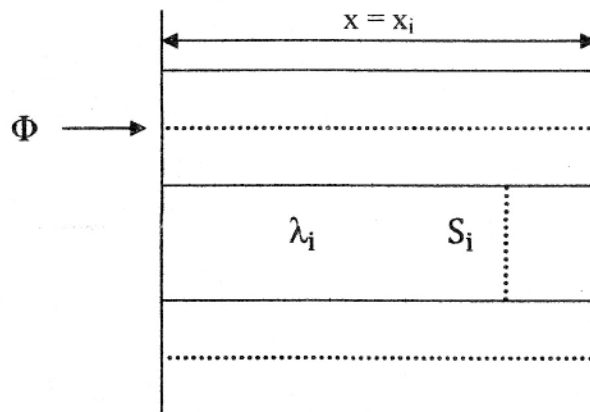


Figure. II.3. Association parallèle.

II.2.1.3. Résistance thermique de contact

La formation d'interface solide - solide, lors d'assemblages industriels, ne peut donner lieu à un contact parfait entre ces solides. Pour illustrer l'effet de contacts imparfaits entre deux solides, nous considérons le schéma de la Figure. II.4.

Entre les zones de contact subsiste un espace interstitiel, en général mauvais conducteur, qui constitue un frein au transfert de chaleur, qui de ce fait passe de manière préférentielle au niveau des contacts directs là où le passage de la chaleur est facilité.

Le champ de température se trouve donc considérablement perturbé dans la région localisée de part et d'autre de l'interface. Il en résulte une constriction des lignes de flux dont dépend la résistance thermique de contact. Celle-ci dépend des propriétés physiques des solides en contact, de l'état des surfaces et de la pression de contact [1], [2], [8].

La résistance thermique de contact de l'écoulement de la chaleur à travers l'interface s'écrit comme suit :

$$R_{ct} = \frac{1}{h_{ct} \cdot S} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

h_{ct} : Coefficient de contact [$\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$] ; ce coefficient est donné pour quelques interfaces solides-solides en fonction de la pression [2], [8]

S : surface [m^2]

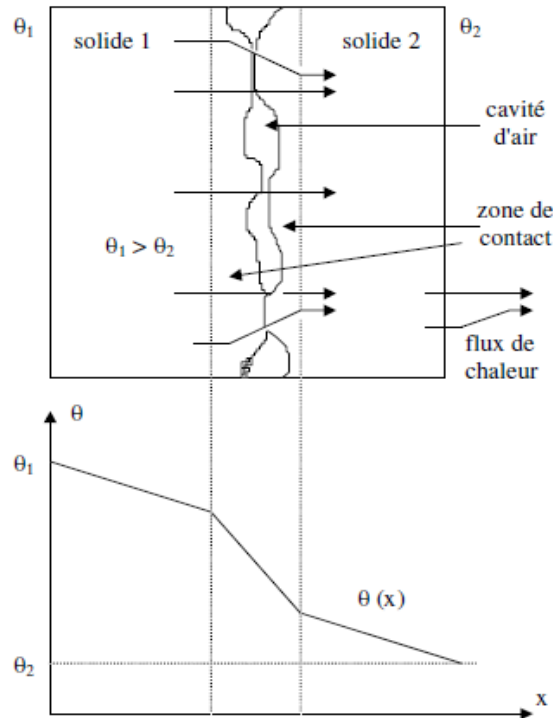


Fig. II.4. Schématisation du contact imparfait entre deux solides

II.2.2. Transfert de chaleur par convection

Le transfert de chaleur par convection est dû au déplacement de la matière par l'intervention d'un fluide en mouvement, de température T_f , au contact d'un solide échauffé ou refroidi, de température T_s . Le mouvement de la matière est dû à des différences de pressions ou de températures.

En effet, toute différence de températures dans un fluide modifie sa densité ce qui conduit à un mouvement au sein du fluide du fait de la poussée d'Archimède. Les parties les plus chaudes du fluide ont tendance à monter et les parties froides et denses à descendre produisant alors un mouvement.

La loi de Newton permet de relier la densité du flux de chaleur à la différence de températures entre les deux milieux par la relation :

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

D'où :

$$R_{th} = \frac{1}{h.S} \quad (\text{II. 12})$$

Avec :

h : est le coefficient d'échange par convection [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$]

T_s : température de la paroi du solide

T_f : Température de référence

R_{th} : Résistance thermique

La convection se produit de deux façons [4], [7], [9] :

- forcée lorsque le mouvement du fluide est entretenu par une action mécanique extérieure. par exemple dans les canaux de la machine. Suivant la convection forcée retenue (air, liquide...), tout ou partie des machines peuvent subir ce type de transfert de chaleur (entrefer, espaces confinés entre têtes des bobines et carcasses [10]).

- libre ou naturelle lorsque le fluide en contact à la paroi se déplace naturellement. La variation de la masse volumique du fluide par élévation de sa température produit le mouvement et donc l'échange de chaleur. Ce mode de transfert est rencontré essentiellement sur les culasses extérieures des machines.

-lorsque les deux modes de transferts sont combinés, il s'agit alors de la convection mixte.

La valeur du coefficient h dépend également du type d'écoulement du fluide qui peut être laminaire ou turbulent [1], [20].

En écoulement laminaire, les filets du fluide se meuvent parallèlement entre eux. La chaleur est ainsi transférée de la paroi aux filets immédiatement voisins et ensuite d'un filet à l'autre.

En écoulement turbulent, en contact avec une paroi solide, la chaleur se transmet par mélange des particules du fluide, les parties les plus chaudes se mêlant mécaniquement aux parties les plus froides, provoquant ainsi une égalisation rapide de la température (on parle alors de la température moyenne du mélange).

II.2.2.1 Calcul du coefficient d'échanges h

Pour établir des relations permettant de déterminer les valeurs de h , nous avons recours à une analyse introduisant des nombres sans dimension. Cette dernière analyse est une méthode empirique basée sur une détermination expérimentale du coefficient d'échange où interviennent des coefficients susceptibles d'influer sur le phénomène physique [2].

Le paragraphe suivant a pour but de synthétiser les relations permettant de déterminer le coefficient de convection. Les principaux paramètres caractéristiques du transfert convectif sont :

- **Nombre de Nusselt N_u**

$$N_u = \frac{h \cdot D_h}{\lambda} \quad (\text{II.13})$$

Le nombre de Nusselt N_u permet d'accéder au calcul du coefficient d'échange h . Le coefficient d'échange h est déterminé de la manière suivante :

$$h = \frac{N_u \cdot \lambda}{D_h} \quad (\text{II.14})$$

D_h : diamètre hydraulique du canal

$$D_h = \frac{4 \cdot S}{P} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

P : périmètre mouillé de la section du passage du fluide (m)

S : section du canal (m^2)

- **Nombre de Reynolds (R_e)**

Il traduit la comparaison entre la viscosité cinématique et la vitesse d'écoulement du fluide :

$$R_e = \frac{\rho \cdot v \cdot D_h}{\mu_d} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

ρ : Masse volumique ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

μ_d : viscosité dynamique (Pa.s)

v : vitesse moyenne du fluide dans le canal (m/s)

- **Le nombre de Grashof (G_r)**

Ce nombre est utilisé en convection libre ou naturelle. Il représente la comparaison entre les forces dues à la dilatation et les forces dues à la viscosité.

$$G_r = \frac{g \cdot B \cdot \delta T \cdot L^3}{\nu^2} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

g : accélération due à la pesanteur ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)

B : Coefficient d'expansion thermique (K^{-1})

L : longueur chauffée (m)

δT : Écart de température entre la paroi et le fluide (K)

▪ **Nombre de Prandtl (P_r)**

$$P_r = \frac{\mu_d \cdot C_p}{\lambda} \quad (\text{II.18})$$

Avec :

C_p : Capacité thermique massique à pression constante ($J.Kg^{-1}.K^{-1}$)

λ : conductivité thermique [$W/m^\circ C$].

μ_d : viscosité dynamique (Pa.s)

▪ **Nombre de Taylor (T_a)**

$$T_a = \frac{r_m \cdot \omega^2 \cdot e^3}{v^2 \cdot F_g} \quad (\text{II.19})$$

Avec :

ω : vitesse angulaire ($rad.s^{-1}$)

e : largeur de l'entrefer (m)

r_m : (m) rayon logarithmique moyen : $r_m = \frac{e}{\ln(\frac{r_e}{r_i})}$

Avec :

r_e et r_i sont respectivement le rayon interne du stator et le rayon externe du rotor.

F_g est un facteur géométrique qui permet de tenir compte du rapport de forme de l'espace annulaire.

La valeur du nombre de Nusselt dépend du type de convection (naturelle, forcée) :

- dans le cas d'une convection forcée.

$$N_u = b_g \cdot (R_e^m \cdot P_r^n) \quad (\text{II.20})$$

- dans le cas d'une convection naturelle.

$$N_u = a_g \cdot (G_r \cdot P_r)^n \quad (\text{II.21})$$

Avec a , b , m et n des constantes qui dépendent de la géométrie étudiée et sont déterminés expérimentalement.

II.3. le rayonnement thermique

Il correspond aux échanges de photons entre un système et son environnement. Tous les corps perdent de l'énergie par rayonnement et en gagnent par absorption du rayonnement ambiant. Dans le cas où l'échange ne se fait qu'entre deux surfaces S_1 et S_2 grises, mates et isothermes, face à face, la loi de Stéphan-Boltzman permet d'écrire [2], [5], [11] :

$$\varphi = \frac{\sigma F_{1-2} (T_2^4 - T_1^4)}{1 + \frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} F_{1-2} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} F_{2-1}} \quad (\text{II.22})$$

Avec :

ε : Emissivité moyenne

σ : Constante de Stephan-Boltzmann ($\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{K}^4]$)

F_{1-2}, F_{2-1} : Facteur d'angle ou facteur de forme géométrique

Cependant, dans notre travail nous négligeons les effets de transfert par rayonnement. En effet, dans une machine électrique l'effet de rayonnement ne peut exister que vers le milieu extérieur ou, au vu des températures mises en jeu, c'est l'effet de convection qui est prépondérant.

Dans la suite, nous nous intéressons aux spécificités du transfert de chaleur dans une machine asynchrone fermée.

II.4 Application à la machine étudiée

Dans le cas de notre étude, la machine étudiée est de type asynchrone à cage de faible puissance, totalement fermée et auto-ventilée. La structure de cette machine est représentée sur la (**figure. II. 5**). Le ventilateur, monté au bout d'arbre, tourne avec le rotor duquel il est solidaire et débite un flot d'air sur la surface externe de la carcasse. La surface d'échange essentielle avec l'environnement est justement celle de cette carcasse, elle-même augmentée d'ailettes pour accentuer le transfert de chaleur, qui se fait principalement par convection forcée.

A l'intérieur de la machine, le transfert de chaleur entre les parties solides se fait par conduction. Le rotor tourne dans l'air emprisonné qui sert d'intermédiaire pour le transfert de chaleur entre les différentes surfaces internes.

A travers l'entrefer, et en absence de la circulation axiale de l'air, la chaleur est transférée radialement depuis la surface du rotor vers le stator. Les modes de transfert que l'on retrouve alors sont la conduction et la convection.

Axialement, les transferts de chaleurs par l'intermédiaire de l'arbre sont réduits compte tenu des surfaces d'échanges réduites disponibles. Les modes de transfert utilisables sont la convection et le rayonnement (négligeable) à travers l'air emprisonné qui véhicule la chaleur des extrémités des parties solides (têtes de bobines, anneaux de court circuit, circuit magnétiques) vers les flasques.

L'ensemble des échanges de chaleur intervenant entre les différentes parties de la machine considérée sont donc représentés par la **figure. II.6.**

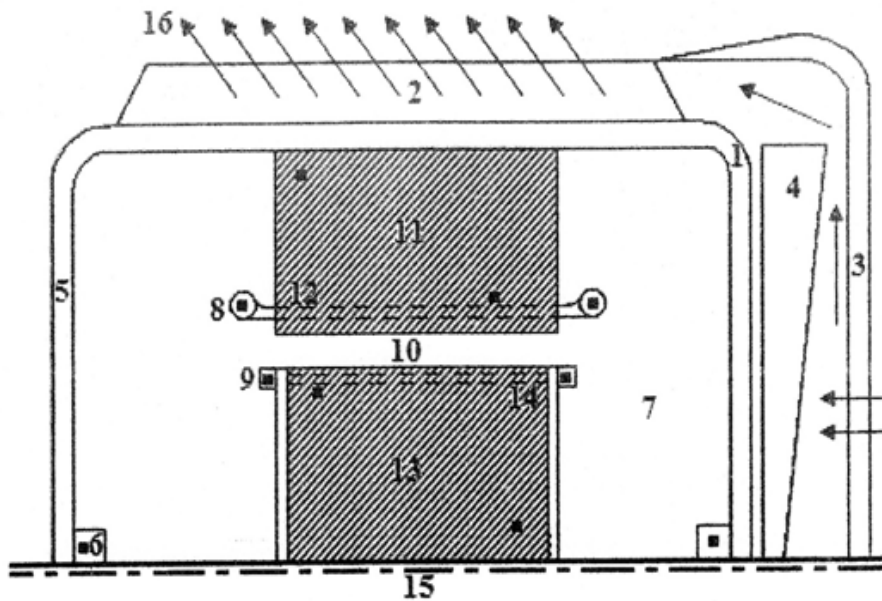


Fig. II.5. Transfert de chaleur dans une machine asynchrone fermée et auto-ventilée

▪ sources de chaleur → circulation de l'air

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

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue brièvement les différents modes de transfert de chaleur, à savoir, la conduction, la convection et le rayonnement et nous avons donné les différentes expressions pour les calculer.

Ensuite, nous avons appliqué ces modes de transfert de chaleur à une machine asynchrone auto-ventilée fermée pour établir une carte des échanges thermiques de la machine.

L'évolution vers l'équilibre thermique se fait donc par transfert de chaleur qui se traduit par des élévations de température qui ne doivent pas dépasser des valeurs qui peuvent porter préjudice un bon fonctionnement de la machine. L'étude thermique se résume donc à établir des modèles qui peuvent prédéterminer ces températures d'une manière exacte.

Ces modèles feront l'objet de notre étude dans le prochain chapitre.

Chapitre III

Différentes méthodes de modélisation thermique

III.1. Introduction

La modélisation thermique des machines électriques n'est pas un problème nouveau. De nombreux travaux ont abordé ce sujet. Certains de ces travaux s'appuient sur des résultats antérieurs, notamment pour la modélisation nodale ou la modélisation numérique basée sur l'utilisation de la méthode des éléments finis.

Dans ce chapitre, nous présentons les principales méthodes utilisées pour déterminer l'échauffement dans les machines asynchrones. Nous constatons que la majorité des travaux publiés dans le domaine associe réalisation expérimentale et modélisation théorique où l'on distingue trois techniques :

- les méthodes dites empiriques ;
- la méthode nodale ;
- et les méthodes numériques.

III.2. Méthodes théoriques

III.2.1. Méthodes empiriques

Nous trouvons ces méthodes dans les ouvrages de construction des machines électriques destinés à la formation des ingénieurs [16]. Ces méthodes permettent d'évaluer la température en régime permanent au point de fonctionnement nominal. Cette estimation, quoique très délicate, vu le nombre important de paramètres qui interviennent, est rendue possible en employant des abaques et des formules issues de l'expérience acquise dans le domaine de construction des machines électriques.

Les températures estimées des parties bien précises de la machine (généralement le cuivre) et pour les alimentations classiques (sinusoïdale ou parfaitement continue), découlent d'un dimensionnement géométrique et électromagnétique effectué au préalable.

Ces méthodes sont de moins en moins utilisées, car les machines conçues actuellement utilisent des technologies et des moyens de calcul plus précis et font appel de moins en moins aux méthodes empiriques. Ceci est d'autant plus vrai, car les actionneurs électromécaniques ne se conçoivent plus sans leurs alimentations et les harmoniques de courant et de tension introduits par celle-ci exigent le développement de nouvelles méthodes de calcul plus rigoureuses.

III.2.2. Méthodes nodales

Cette méthode de modélisation, très ancienne [2] consiste à ramener l'étude du comportement thermique à un schéma équivalent électrique en utilisant des résistances et des capacités thermiques. Les pertes constituent alors la source de chaleur et le potentiel aux différents nœuds donne la température. La machine est considérée comme un assemblage de pièces homogènes dans sa construction et son fonctionnement.

Nous rappelons sur la Table (III.1) l'analogie thermoélectrique et sur le tableau (III.2). Les expressions générales des résistances thermiques pour différents modes d'écoulement.

Grandeurs thermiques	Grandeurs électriques
Puissance calorifique	Courant électrique
Température	Tension
Conductance thermique	Conductance électrique
Capacité calorifique	Capacité électrique

Table I.1 : Analogie thermoélectrique

Mode de transfert	Expression de la résistance
Conduction	$R_{\text{cond}} = \frac{L}{\lambda S}$
Convection	$R_{\text{conv}} = \frac{1}{h S}$
Rayonnement	$R_r = \frac{1}{\varepsilon_e \sigma S (T^4 - T_{\text{ref}}^4)}$

Tableau III.2. Résistance thermiques pour différents modes de transfert de chaleur

En régime permanent, on détermine les températures aux nœuds en résolvant le système suivant :

$$[G]\{\theta\} = \{q\} \quad (\text{III.1})$$

Où :

G : la matrice des conductances thermiques

θ : le vecteur des températures inconnues

q : le vecteur des sources de chaleur (pertes)

L'approximation la plus simple est de considérer la machine composée de trois parties homogènes (bobinage statorique, fer statorique et fer rotorique). Une autre approximation, plus performante divise la machine en cinq parties comme présenté par la Figure (**fig. III.1**).

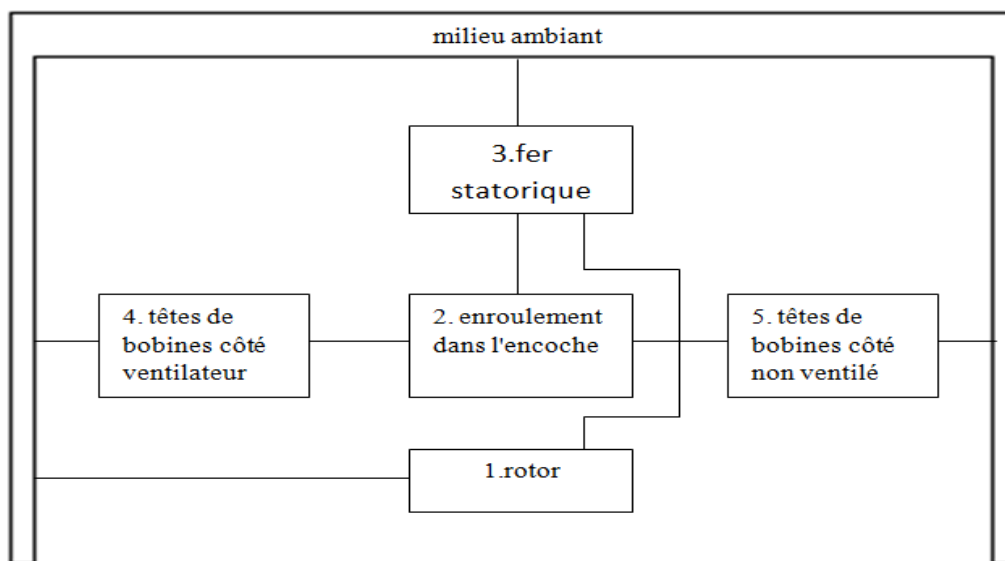


Fig III.1. Découpage en 5 corps du moteur à induction

Une autre alternative toujours en utilisant la méthode nodale est d'introduire la notion de blocs, ces blocs doivent tous présenter des homogénéités, tant du point de vue géométrique que du point de vue physique et thermique [1].

- L'unité géométrique se traduit par une forme qui se ramène à un volume simple (cylindre, sphère, ... etc)
- L'unité thermique se traduit par l'uniformité de la production de chaleur (lorsqu'elle existe)

Un bloc représente une partie homogène de la machine (unité physique), qui peut être uni, bi, ou bien tri directionnel et dans chaque direction un nombre bien défini de nœuds et de résistances thermiques, qui est issu de la résolution analytique de l'équation de la chaleur en régime permanent. En suite ces nœuds sont raccordés à un nœud central représentant la température moyenne d'un bloc, ce qui suppose que le transfert de chaleur est indépendant dans chaque direction.

La machine électrique représente un système thermique complexe, mais elle présente plusieurs symétries, ainsi les diverses parties solides actives (blocs) peuvent s'inscrire dans une géométrie de résolution cylindrique, la subdivision de cette géométrie en composants élémentaires est généralement basée sur la carte des échanges thermiques dans la machine (**figure II.6**), selon le compromis entre la simplicité du modèle et la qualité de l'information désirée, ce qui implique que le modèle thermique qui sera mis en place doit représenter simplement et fidèlement que possible les parties actives de la machine.

Les difficultés liées à l'application de cette méthode sont de trois types [14] :

- La détermination des conductivités et des capacités thermiques dans des matériaux non homogènes.
- La localisation des sources de chaleur qui dépend directement de la séparation des pertes dans la machine. Ce problème est rendu encore plus accru dans le cas des alimentations par des convertisseurs statiques.
- La prise en compte de la ventilation ou de la source de refroidissement.

Soit un réseau thermique comprenant n nœuds. A tout instant, l'équation du bilan thermique pour le nœud (bloc) i , s'écrit ainsi :

$$C_i \frac{dT_i}{dt} + G_{ij}(T_i - T_j) + \dots + G_{in}(T_i - T_n) = P_i \quad \text{(III.2)}$$

Où:

T_i, \dots, T_n : surélévation de la température des blocs i, \dots, n par rapport à la température du milieu ambiant

G_{ij} [W/°C] : conductance thermique de connexion entre les blocs i et j

C_i [J/°C] : capacité thermique du bloc i

P_i [W] : chaleur par unité de temps générée dans le bloc i

En régime permanent thermique, l'équation (III.2) devient :

$$G_{ij} (T_i - T_j) + \dots + G_{in} (T_i - T_n) = P_i \quad \text{(III.3)}$$

Ainsi nous pourrions définir, pour les nœuds du réseau thermique un système à n équations différentielles pour l'équation (III.2) et n équations algébriques pour l'équation (III.3) qui traduit le comportement thermique transitoire ou permanent.

La capacité thermique est introduite lors d'une étude transitoire afin de représenter la variation de l'énergie interne, elle est donnée par la formule :

$$C_{th} = \rho C_p V \quad \text{(III.4)}$$

Les éléments minces seront représentés par de simples résistances thermiques de contact

$$R_{thcon} = \frac{d}{S\lambda} \quad \text{(III.5)}$$

Où :

C_{th} : capacité thermique [J/°C]

C_p : capacité calorifique

V : volume élémentaire

d : épaisseur de contact

ρ : masse volumique

La difficulté majeure pour la mise en œuvre d'un modèle thermique nodal réside dans la détermination des conductances et capacités thermiques qui dépendent de la géométrie, des propriétés thermiques des matériaux et des échanges de chaleur, ainsi que de la localisation des sources de chaleur qui dépend elle-même directement de la séparation des pertes dans la machine et de la prise en compte de la source de refroidissement (ventilation) [4], [18].

III.2.3. Méthodes numériques

Les méthodes de résolution numérique présentent de plus grands avantages au détriment d'une complexité certaine. Ces méthodes sont basées sur un découpage plus ou moins fin du système modélisé et permettant de tenir compte de plusieurs paramètres (linéarité, géométrie complexe...etc), généralement non considérés avec les méthodes analytiques.

Les méthodes numériques les plus utilisées dans le domaine de la thermique sont les différences finies et les éléments finies.

III.2.3.1 Méthode des différences finies

La méthode des différences finies a trouvé diverses applications dans les domaines traditionnels de la thermique [14]. Cette méthode permet la résolution numérique des équations dérivées de la forme différentielle de l'équation de transfert. A chaque élément est associé un nœud relié aux nœuds voisins par un nombre fini de connexions. La température de chaque nœud est exprimée en fonction de celle des nœuds adjacents.

III.2.3.2 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est largement utilisée à l'heure actuelle, pour ses possibilités de calcul de la distribution de températures dans la machine avec une grande précision et les différents couplages envisageables. Une tendance actuelle dans les simulations numériques est le couplage électromagnétique et thermique dans le cas des machines électriques. La difficulté majeure en utilisant la méthode des éléments finis est l'étude du problème thermique de la machine électrique en 3D. En effet, il est en particulier difficile avec cette méthode de tenir compte des couches fines dans certaines parties de la machine et de prendre en compte l'éventuel échauffement du liquide de refroidissement [10]. De plus, le temps de calcul nécessaire au traitement de ce type de problème est souvent important.

Résoudre un problème thermique par EF consiste à déterminer la répartition spatio-temporelle de la température.

III.2.3.2.1 Etapes de résolution

La méthode des éléments finis consiste à remplacer un problème continu par un problème discret équivalent, en utilisant une approximation simple des variables inconnues sur des sous-domaines pour transformer les équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques dont la résolution fournit une solution approchée du problème.

Cette méthode fait appel aux trois domaines suivant [14] :

- Sciences de l'ingénieur pour construire les équations aux dérivées partielles.
- Méthodes numériques pour construire et résoudre les équations algébriques.
- Programmation et informatique afin d'exécuter automatiquement les calculs.

Les principales étapes permettant la mise en œuvre de cette méthode sont schématisées dans la figure suivante :

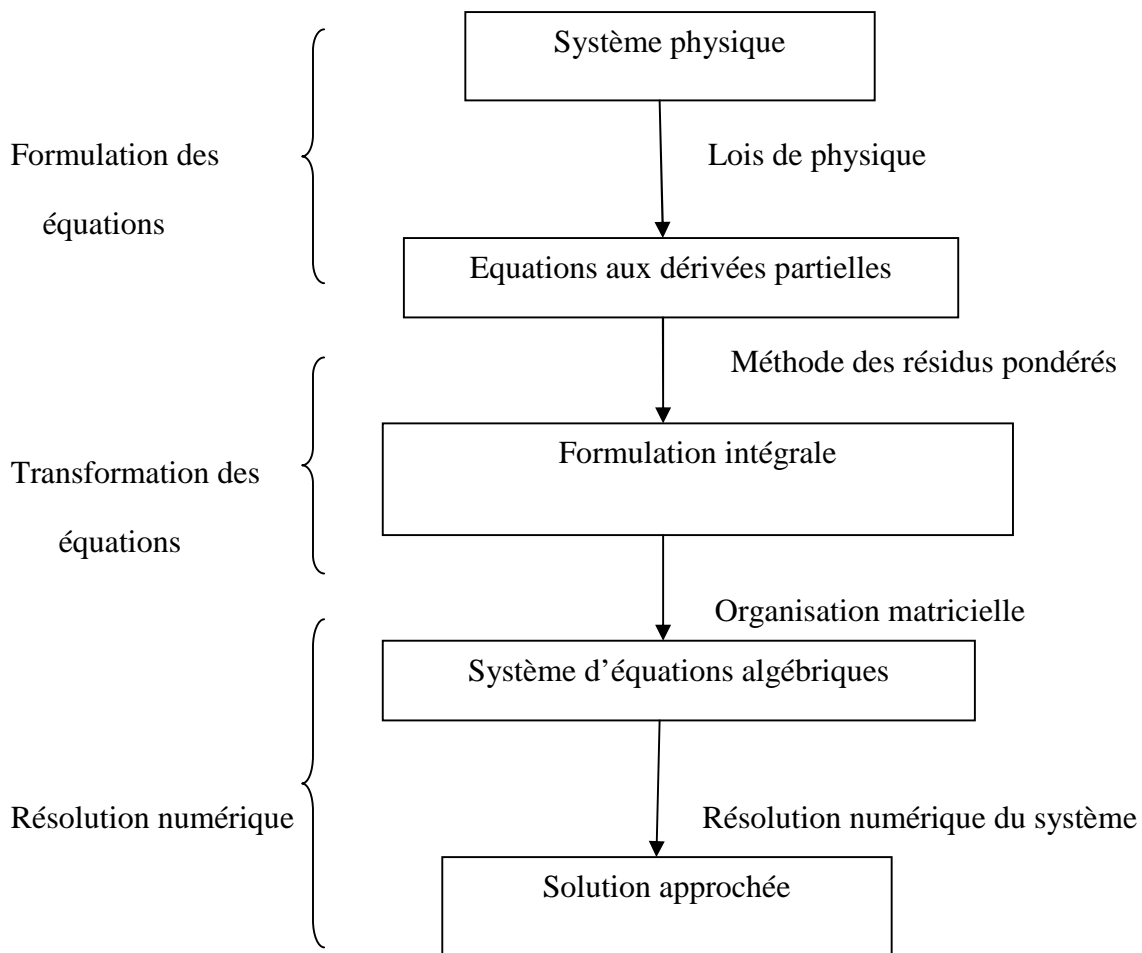


Fig. III.2 Principales étapes de la mise en œuvre de la MEF [14]

III.3 Méthodes expérimentales

L'association des données expérimentales et des modèles thermiques théoriques permet de vérifier la validité de ces derniers et de déterminer certains paramètres plus ou moins bien connus du modèle (pertes, coefficients d'échange de chaleur, résistances et capacités thermiques).

Les méthodes expérimentales consistent à réaliser des maquettes pour mesurer avec précision la distribution de la température dans la machine et de maîtriser les phénomènes d'échanges de chaleur ayant lieu à l'intérieur de la machine ou bien avec le milieu extérieur.

III.3.1 Méthode calorimétrique

Une première approche qui permet de déterminer les pertes dans une machines électrique, consiste en une infrastructure lourde car il faut mettre cette machine dans une enceinte isolée et mesurer l'énergie calorifique évacuée par le système de refroidissement.

Un schéma d'une telle réalisation est présenté sur la figure III.2. C'est une méthode très lente, qui requiert l'utilisation des moyens de mesure très précis. Les difficultés liées à l'utilisation de cette méthode sont [18]:

- Existence des pertes de chaleur aux parois de l'enceinte qui emmagasinent de l'énergie calorifique ;
- Fuite de chaleur au contact arbre-parois (défaut d'isolant) ;
- Imprécision des appareils de mesure.

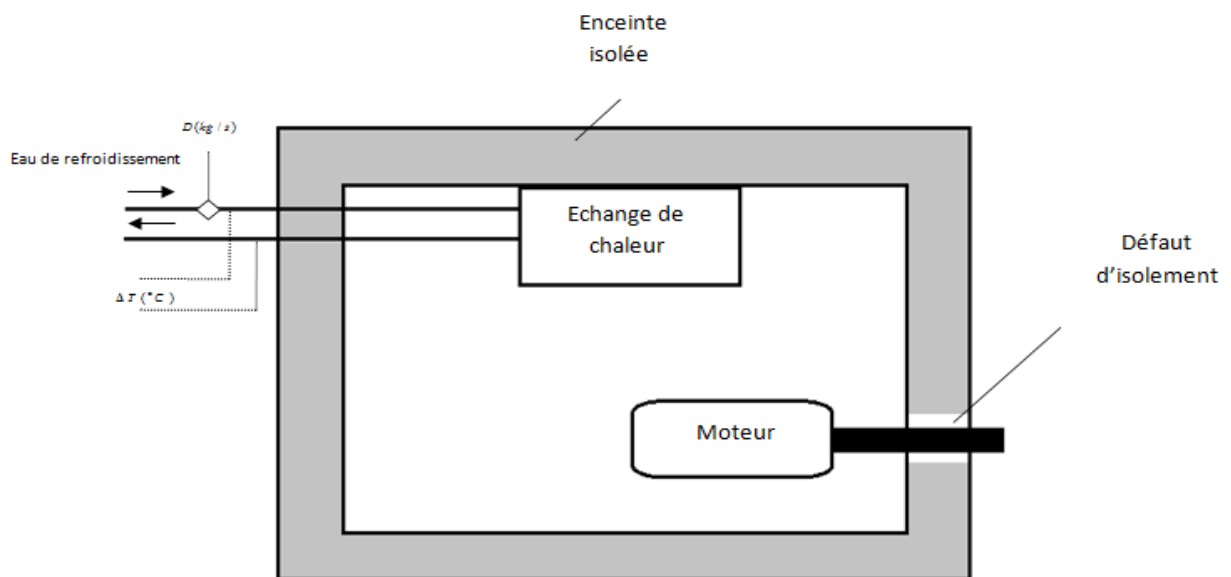


Fig.III. 2. Dispositif de mesure calorimétrique

III.3.2. Mesure de température par des capteurs

La deuxième méthode expérimentale consiste à placer des capteurs de température en différents endroits stratégiques de la machine et mesure la température en ces points en utilisant des systèmes d'acquisition de données souvent reliés à un ordinateur. Les capteurs les plus utilisés étant les thermocouples et les thermistances.

III.3.2.1. Les thermocouples

III.3.2.1.a. Définition

Les thermocouples sont des capteurs de grande variété qui peuvent assurer les mesures dans une large gamme de température. Un thermocouple est constitué de deux fils métalliques différents (**A** et **B**), soudés à l'une de leurs extrémités appelée «soudure de mesure», l'autre extrémité forme la jonction de référence qui doit être maintenue à une température uniforme et stable (référence à 0°C dans les normes internationales).

III.3.2.1.b. Principe de mesure de température par un thermocouple

Quand on ouvre un circuit de deux métaux **A** et **B** (fig. III.3) soumis à des différences de température quelconque, une force électromotrice (f.e.m) apparaît, cette dernière dépend de la nature des métaux et de l'écart existant entre les températures T_1 et T_2 des deux points de jonction des métaux. En particulier, si les températures T_1 et T_2 sont identiques, la f.e.m produite est nulle même si les points intermédiaires des métaux **A** et **B** sont portés à des températures différentes de T_1 et T_2 .

Un thermocouple produit donc une f.e.m en rapport avec les températures des deux jonctions, la température du milieu considéré sera déterminée en mesurant cette force électromotrice que délivre le thermocouple.

Le générateur thermoélectrique fournit une différence de potentiel (ddp) directement exploitable à l'entrée d'un amplificateur. Cette ddp est en fonction de la différence de température entre la jonction dite de mesure (appelée aussi soudure chaude) et celle de référence (appelée aussi soudure froide) supposée connue.

On appelle :

- **Soudure chaude** : jonction de l'ensemble thermocouple soumis à la température à mesurer (c'est la jonction capteur).
- **Soudure froide** : jonction de l'ensemble thermocouple maintenu à une température connue ou à 0°C (c'est la jonction de référence). Donc un thermocouple produit une f.e.m en rapport avec les températures des deux jonctions.

Le montage utilisé est schématisé par la figure (**fig. III.3**) où A et B sont des conducteurs de matériaux différents.

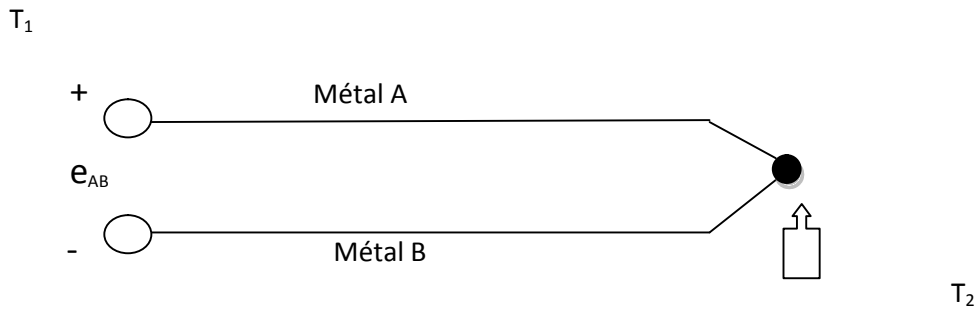


Fig. III.3 : Schéma descriptif d'un thermocouple

III.3.2.1.c. Avantages et inconvénients des thermocouples

- Avantages

- Robustesse: pour leurs simplicités, ils résistent aux chocs et vibrations.
- Une grande souplesse d'utilisation et non encombrant.
- Gamme de température très large, ils peuvent convenir jusqu'à 1700 °C (3100 °F).
- Une vitesse de réponse très élevée.

-Inconvénients

- La température de référence doit être connue.
- Défaut d'isolement au-delà de 1800K ou isolement difficile.
- La non-linéarité.
- La nécessité d'une correction automatique ou manuelle due à la température de la soudure froide.
- Faible amplitude du signal.

III.3.2.2 La thermistance

III.3.2.2.a Définition

Les thermistances sont tout simplement des résistances qui ont la propriété de varier en fonction de la température. Elles sont constituées à partir de mélange d'oxydes métalliques semi-conducteurs polycristallins tels que : Mg O, Mg Al₂ O₄, Fe₃ O₄...

III.3.2.2.b. Principe de mesure de la température par des thermistances

Les thermistances sont branchées en série avec un générateur, présentant une résistance variable. Elles se laissent traverser par un courant également variable, en fonction de leur température.

Les oxydes en poudre sont agglomérés par compression et durcis par frittage à des températures de l'ordre de 1000°C. Les fils métalliques de liaison sont soudés en deux points de la surface semi-conductrice préalablement métallisée [19].

Des études comparant les avantages et les inconvénients de ces deux types de capteurs guident l'utilisateur dans le choix des thermocouples ou des thermistances. Sur le tableau (III.3), une comparaison des principales caractéristiques de ces capteurs est donnée [14] :

Caractéristique	Thermistance	Thermocouple
précision	Plus précis	Moins précis
encombrement	important	Réduit
Cout	Plus cher	Moins cher
Temps de réponse	lent	Rapide
Nécessité d'une alimentation	nécessaire	Pas nécessaire
Auto échauffement	existant	non existant
Reproductibilité des résultats	bonne	Moyenne
Stabilité dans le temps	bonne	Moins bonne
Gamme de température	réduite	Large
sensibilité	Peu sensible aux bruits extérieurs	Assez sensible aux parasites

Tab.III.3 Comparaison des principales caractéristiques des thermistances et des thermocouples

III.3.3 La caméra thermique

La camera thermique est l'un des équipements nécessaire à la thermographie infrarouge. Celle-ci consiste à détecter des tendances thermiques ou variations de température dans les objets.

Ces variations permettant à l'utilisateur de déceler les problèmes avant que le temps d'arrêt coûteux ne soit nécessaire, ce qui permet également de surveiller les problèmes imminents afin de prévoir la maintenance lors d'un arrêt planifié ou dès que le budget est disponible.

Cette camera thermique peut être utilisée dans plusieurs secteurs d'activités, comme le bâtiment, l'automobile, dans le domaine scientifique, ... etc. Elle peut également être employée à des fins personnelles, pour prévenir des problèmes d'humidité en mesurant le niveau d'isolation dans une habitation par exemple.



Figure.III.4 : Caméra thermique

III.3.4 Avantages et inconvénients de la caméra thermique

- Avantages

- Prévention des risques.
- Economie et gain de temps.
- Détection et traitement du problème avant que les premières symptômes d'un défaut soient visibles.
- Outils de grande précision et facilité d'utilisation.

-Inconvénient

- La caméra thermique donne une carte de température surfacique. Elle ne permet pas de voir les informations en profondeur.

IV. Conclusion

Nous avons apporté dans ce chapitre des éléments d'information sur les différentes méthodes d'étude du comportement thermique des machines électriques. La modélisation thermique en utilisant la méthode nodale ou la méthode numérique (Différence finie et éléments finis) présentent des difficultés liées à la complexité de transfert de chaleur dans ces machines électriques liée à la géométrie de ces dernières ainsi qu'à la non uniformité des matériaux utilisés. Le recours à des hypothèses simplificatrices est donc nécessaire, ce qui limite la précision des résultats. De plus, un modèle théorique n'est jamais validé sauf s'il est comparé à des résultats expérimentaux. Donc les méthodes expérimentales restent incontournables si on veut avoir l'image la plus proche de la réalité et si on veut valider un modèle quelque soient les degrés de sa sophistication et sa complexité.

C'est pour ces raisons qu'on a choisi la méthode expérimentale pour conduire notre investigation dans ce mémoire. Nous présentons dans le prochain chapitre avec plus de détails les outils qui vont nous permettre de conduire cette étude expérimentale en utilisant des thermocouples et une caméra thermique pour mesurer les élévations des températures dans un moteur asynchrone à cage auto-ventilé de 2.2 kW.

Chapitre IV

Etude expérimentale et
interprétation des résultats

IV.1. Introduction

La connaissance de la température en tous points d'une machine électrique en général, et dans la machine asynchrone en particulier est très importante. Elle nous permet d'améliorer la résistance de la machine face aux températures élevées et prendre des précautions lors de son utilisation, et cela pour la protéger contre les élévations excessives de la température qui sont liées aux pertes générées dans les différentes parties de la machine ainsi qu'aux caractéristiques thermiques des matériaux utilisés et aux conditions de refroidissement.

Ce chapitre sera consacré à l'étude du comportement thermique d'une machine asynchrone de 2,2 kW, fermée auto-ventilée, et cela pour différents régimes de fonctionnement. Pour effectuer cette étude, on va utiliser deux méthodes expérimentales : les thermocouples et la caméra thermique. Pour la première méthode, la machine sera équipée d'un nombre déterminé de capteurs placés dans les endroits les plus susceptibles d'être des sources de chaleur et accessibles physiquement (facilité d'accès). Ensuite, on va utiliser une caméra thermique pour capter la température des mêmes endroits. On finira par conduire une étude comparative en utilisant les différents résultats obtenus par les deux méthodes.

On va commencer par présenter la machine asynchrone étudiée, le banc d'essai, suivi de la présentation et l'interprétation des différents résultats des essais effectués et réalisés au sein du laboratoire de machines électriques (Tec 423) du département d'Electrotechnique (Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou), puis on va faire une comparaison entre les résultats obtenus par les deux méthodes utilisées.

IV.2. Présentation du moteur étudié

Le moteur qui fait l'objet des différents essais est un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil pourtant les caractéristiques suivantes :

- De type 890-100-1064-0041.
- De marque ENEL (électro-industrie) N°22-128-02.
- De puissance 2,2 kW.
- Fonctionne sous une tension nominale de 380V.
- Absorbe un courant nominal de valeur 5,2A en triangle.
- Une vitesse de rotation de 1410 trs/min.
- Facteur de puissance, $\cos=0,83$.
- De classe d'isolation F (155°C).
- Totalement fermé, auto-ventilé (Totally enclosed fan cooled TEFC)

IV.3. Description du banc d'essai

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

- ❖ Une génératrice à courant continu pour les essais en charge. Elle possède les caractéristiques suivantes :
 - ✓ de type DL2062
 - ✓ puissance nominale 2,4 KW
 - ✓ tension nominale 220V
 - ✓ courant nominal 10,9A
 - ✓ vitesse nominale 1420 tr/min
 - ✓ courant d'excitation égal à 1,6 A, et elle est de classe d'isolation F.

- ❖ Des différents appareils de mesure et d'alimentation :
 - Une source d'alimentation triphasé fixe 380V/6A, variable en alternatif et une source continue.
 - Différents appareils de mesure (Ampèremètres, Voltmètres, Wattmètres, transformateur de courant, Tachymètre, Chronomètre, Thermomètre et balance pour mesurer le couple).
 - Des capteurs de température.
 - Un enregistreur de température (CA 625 ECOPOINTER)
 - Des résistances variables et une charge résistive.
 - Des fils électriques de câblage.

IV.3.1. Photographie et schéma du banc d'essai

Une photographie ainsi que le schéma synoptique de câblage du banc d'essais sont donnés respectivement par les figures (IV.1 et IV.2).

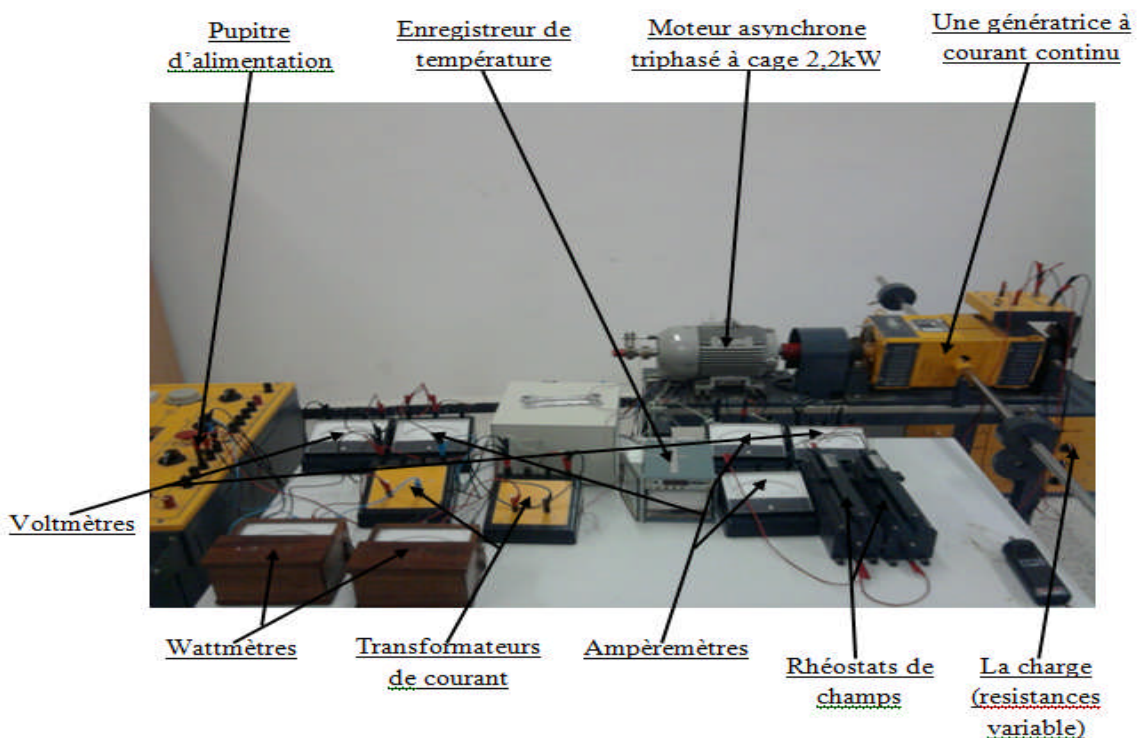


Fig. IV.1. Photographie du banc d'essai de mesure de température

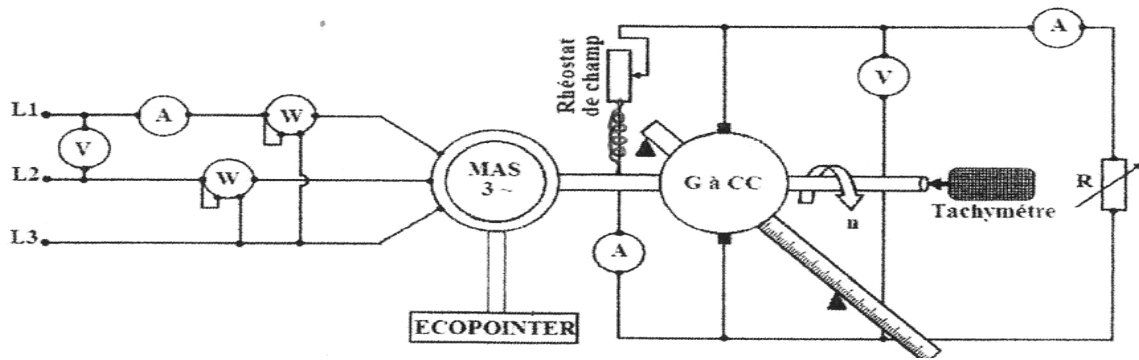


Fig. IV.2. Schéma descriptif du banc d'essai

IV.4. Description de l'enregistreur de température

IV.4.1. Définition

L'ECOPOINTER avec six voies de mesure enregistre toute variable physique préalablement traduit en signal électrique comme la température, la pression, le débit, la puissance, la vitesse...etc. Les voies d'entrées étant indépendantes ; six grandeurs peuvent être enregistrées en même temps ; de plus il nous permet la lecture directe de la température requise.

IV.4.2. Alimentation

Le CA 625 ECOPOINTER est prévu en standard pour une alimentation de 230V en courant alternatif, il est possible de l'utiliser en 115V en courant alternatif en modifiant le strap situé sur la carte arrière de l'appareil.

L'enregistreur est protégé par un fusible de 250mA, il est muni d'interrupteur qui permet la mise de l'enregistreur hors tension sans avoir à le débrancher.

Tous les paramètres mécaniques nécessaires au fonctionnement sont traduits en face avant au moyen de touches d'exploitation, sans démontage de l'appareil (**Fig. IV.3**). Une sécurité d'accès doit être franchie pour accéder à la programmation, cette «clé soft» interdit toute modification pour un personnel non autorisé.

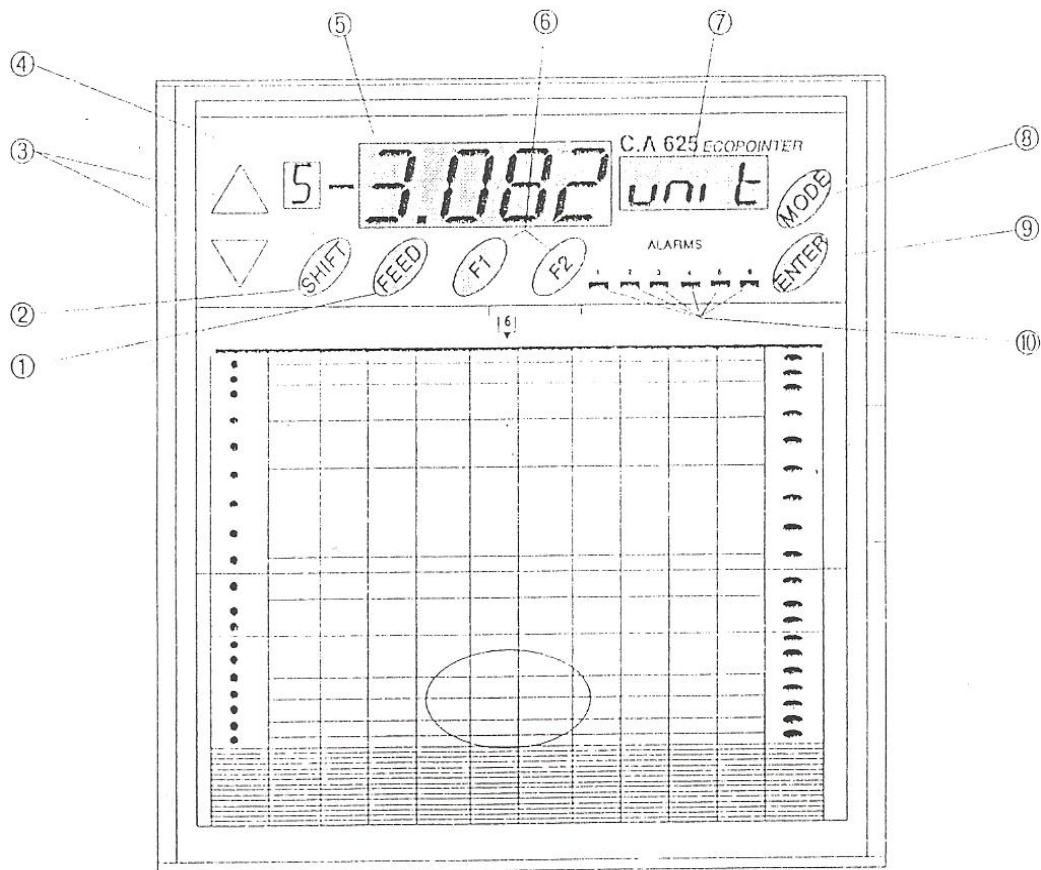


Fig. IV.3. Face avant de l'appareil de mesure de température

- (1) Touche FEED : Avance Papier.
- (2) Touche SHIFT : Permet de doubler la fonction des touches. Voir dans chaque mode sa fonction.
- (3) Touche ▲ et ▼ : Touches de déplacement dans les menus, de réglage ou de changement de voie.
- (4) Numéro de la voie affichée : 1digit LED rouges, 7 segments de 7,6 mm.
- (5) Affichage des mesures : 4 digits LED rouges, 7 segments de 13,6 mm.
- (6) Touches F₁ et F₂ : Touches d'exploitation. Voir leur fonction en mode utilisation.
- (7) Affichage unités et mnémoniques : 4 digits LED vertes, 7 segments de 7,6 mm.
- (8) Touche MODE : permet de changer le mode d'affichage des voies (Cyclique/Fixe).
- (9) Touche ENTER : touche de validation et de sélection.
- (10) Voyants de signalisation : 6 voyants (visualisation d'alarmes).

IV.5. Choix de l'emplacement des thermocouples

Le moteur asynchrone qui fait l'objet de la présente étude thermique est équipé de sept (7) capteurs placés dans des lieux où règnent des températures différentes (dans le stator, l'arbre du rotor et dans l'entrefer).

L'ajustement des capteurs est effectué par une colle métallique spéciale qui permet l'obtention d'un excellent contact thermique résistant à la chaleur, et pour cela nous obtenons des valeurs plus précises de la température.

La numérotation ainsi que l'emplacement des thermocouples dans le moteur asynchrone sont représentés par la figure (fig. IV.4)

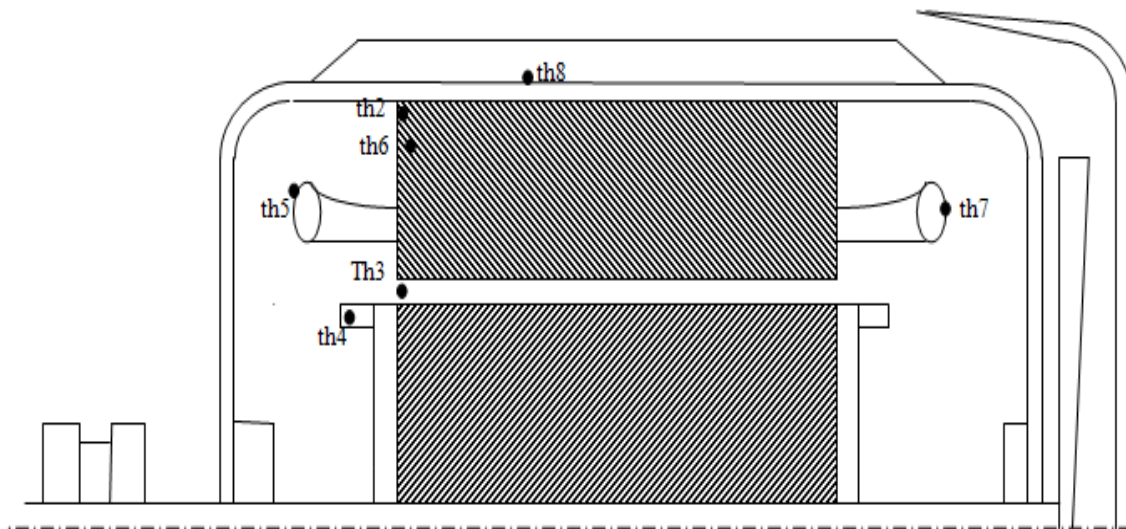


Fig. VI.4. Emplacement des thermocouples

th2: la dent statorique

th3: l'entrefer

th4: anneaux de court-circuit du rotor

th5: têtes de bobine côté non ventilé

th6: l'encoche statorique

th7: têtes de bobine côté ventilé

th8: carcasse

IV.6. Présentations de la Caméra infrarouge C.A 1879

La camera avec laquelle on travaille est une camera infrarouge C.A 1879, elle est représentée comme suit :

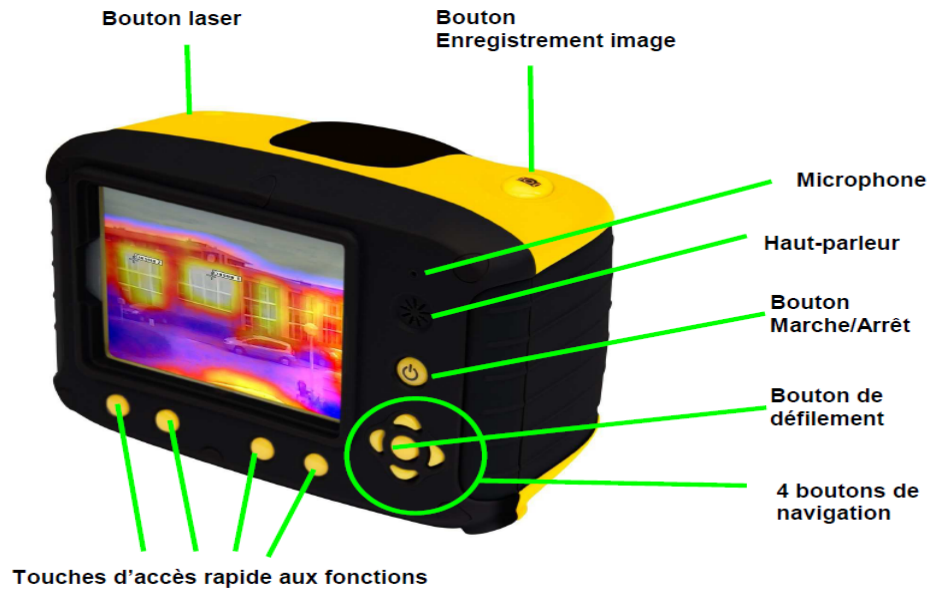


Fig. IV.5. Principales caractéristiques de commande

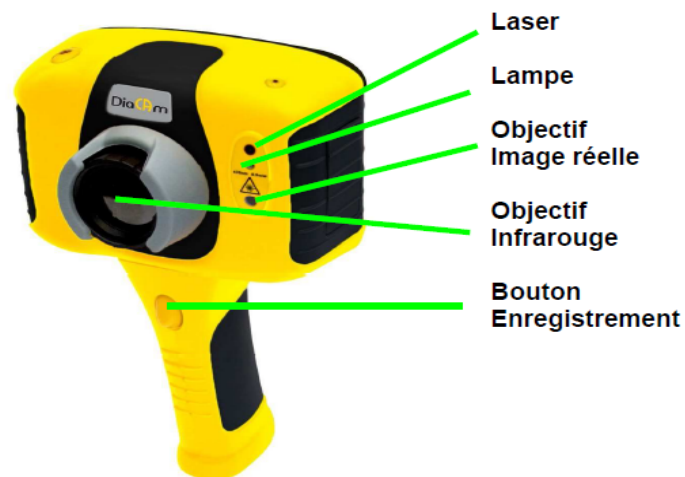


Fig. IV.6. Prise en main

IV.6.1. Présentation du menu principal

Comme tous les appareils le menu de la C.A1879 porte toutes les informations qui la concerne et tous les réglages qu'on peut lui effectuer.

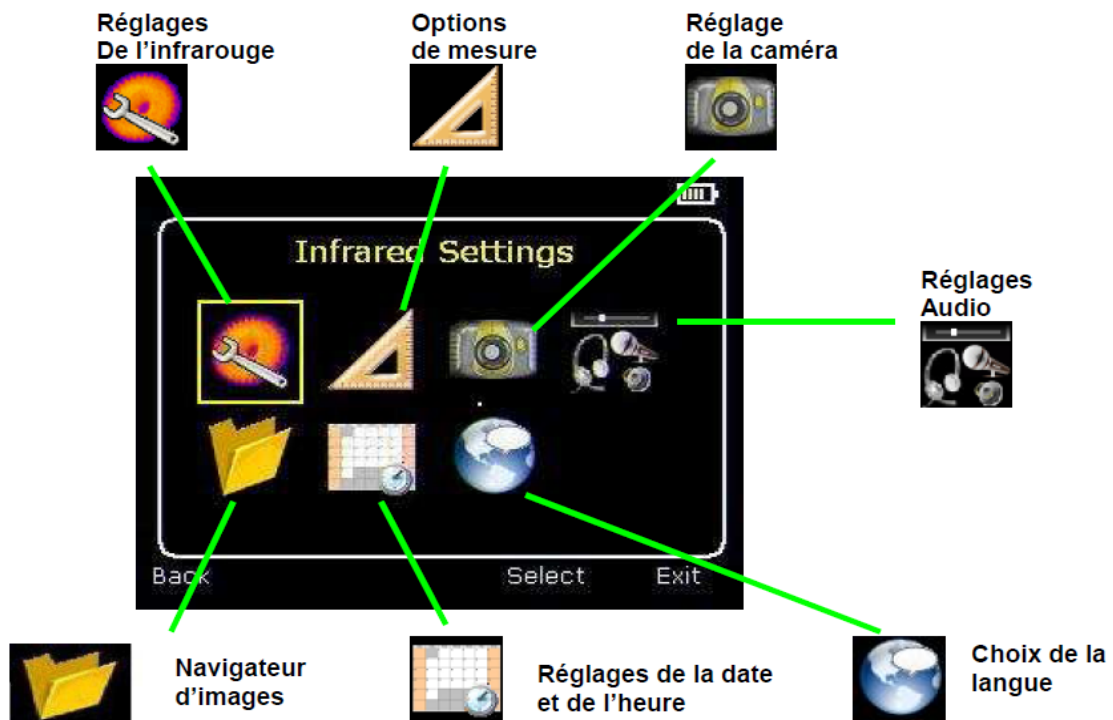


Fig. IV.7. Menu principal de la camera thermique

IV. 6.2. Mesure de la température

Les relevés de points de température apparaissent en haut de l'écran. Dans le mode par défaut, l'unique température en °C correspond au point central du curseur. Les autres valeurs en haut de l'écran correspondent aux paramètres d'émissivité et au réglage de la température réfléchi. Il est possible de sélectionner d'autres outils dans le menu « options de mesure ». La plage de température de la scène est indiquée sur une échelle à droite de l'écran.

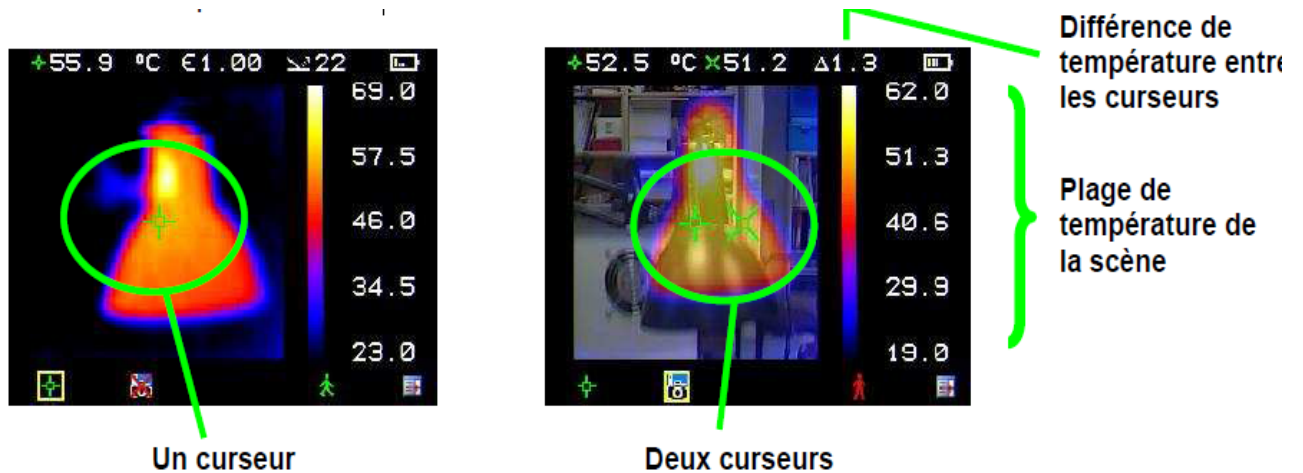


Fig. IV.9. Options de mesure de température

IV. 6.3. Fusion des images visuelle et thermique

La caméra peut afficher une image 100% thermique, une image 100% visuelle de la scène, ou encore un mélange des deux.

IV.6.4. Environnement

- ✓ Plage de température de service : -5 °C à +45 °C
- ✓ Humidité : 10 % à 90 % sans condensation
- ✓ Plage de température de stockage : -20 °C à +60 °C
- ✓ Marquage CE (Europe)
- ✓ Protection : IP54
- ✓ Température d'utilisation pour la précision indiquée : 23 °C

❖ Pour effectuer notre tâche on doit fixer le réglage des paramètres suivants :

- ✓ la température ambiante
- ✓ émissivité $e=0.94$
- ✓ distance $d=0.5$ ou $1m$

La camera dispose d'un logiciel **DiaCAM report**, logiciel PC C.A 1879 sur lequel on trouve toutes les notices de fonctionnement de l'appareil.

Remarques

- On a étalonné les thermocouples fixés sur le moteur; en mettant ce dernier dans un four électrique de température fixe connue. Pour s'assurer que les thermocouples sont bons ils doivent lire la même température du four si non on doit les corriger en conséquence.
- On a percé le moteur au niveau du flasque pour qu'on puisse avoir la température du rotor en utilisant la camera thermique.
- Pendant le fonctionnement de la machine, on a capsulé le trou avec un bouchon d'une bouteille d'eau pour ne pas influencer les températures captées par les thermocouples.

IV.7. Différents essais expérimentaux effectués sur le moteur

- Essai à vide ;
- Essai en charge nominale ;
- Essai en demi-charge nominale.

Remarque

T_{ai} : représente la température ambiante initiale [$^{\circ}\text{C}$].

T_{af} : représente la température ambiante finale [$^{\circ}\text{C}$].

C_n : Couple nominal [Nm].

th: thermocouple [$^{\circ}\text{C}$].

IV.8. Présentation des résultats des essais effectués

IV.8.1. Essai à vide

Cet essai permet d'alimenter le moteur avec sa tension nominale, sans être couplé à une charge, c'est-à-dire, à un couple approximativement égale à zéro ($C_n=0$) et sa vitesse de rotation proche de la vitesse synchrone.

Le schéma du montage est représenté par la figure suivante

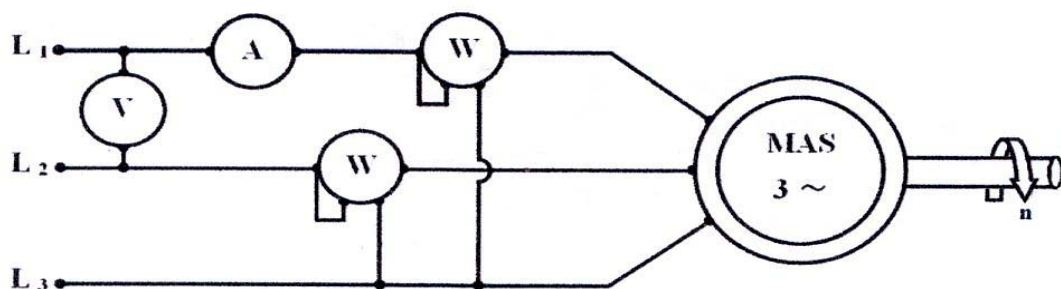


Fig. IV.10. Schéma de montage à vide

Les températures obtenues dans cet essai avec les thermocouples et avec la camera sont illustrées par les figures (IV.10.a, IV.10.b, IV.10.c. et VI.10.d).

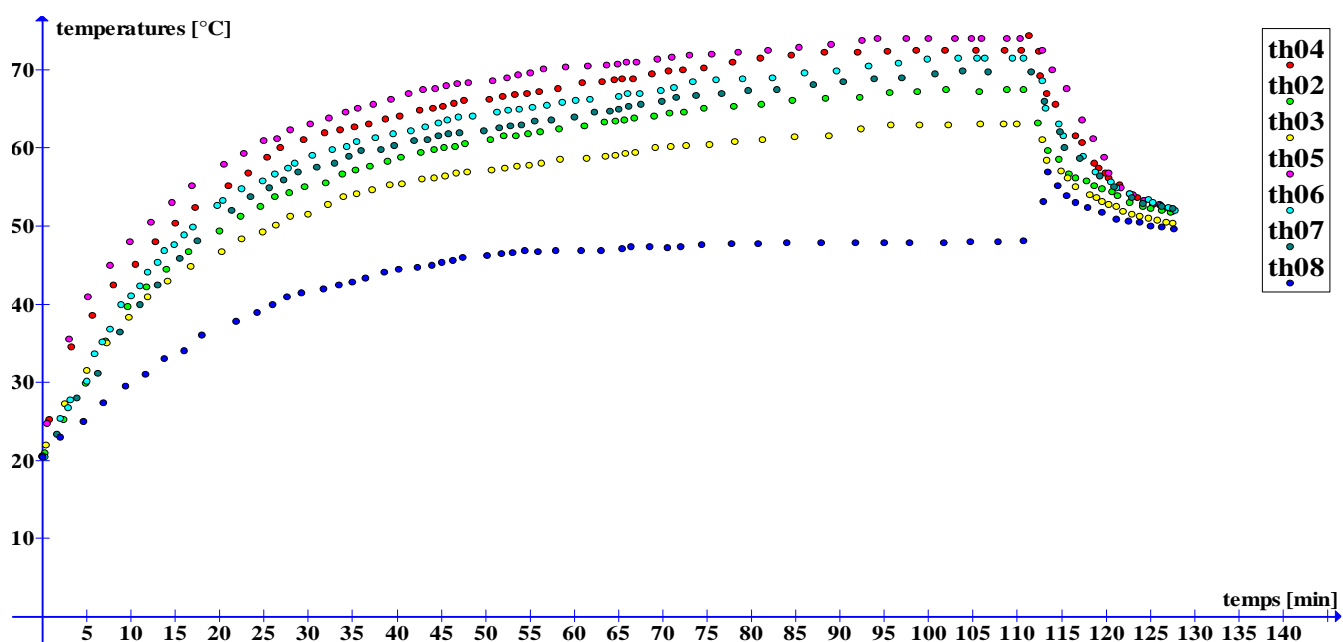


Fig. VI.10.a. Echauffement du moteur à vide ($T_{ai}=21^{\circ}\text{C}$, $T_{af}=22^{\circ}\text{C}$)

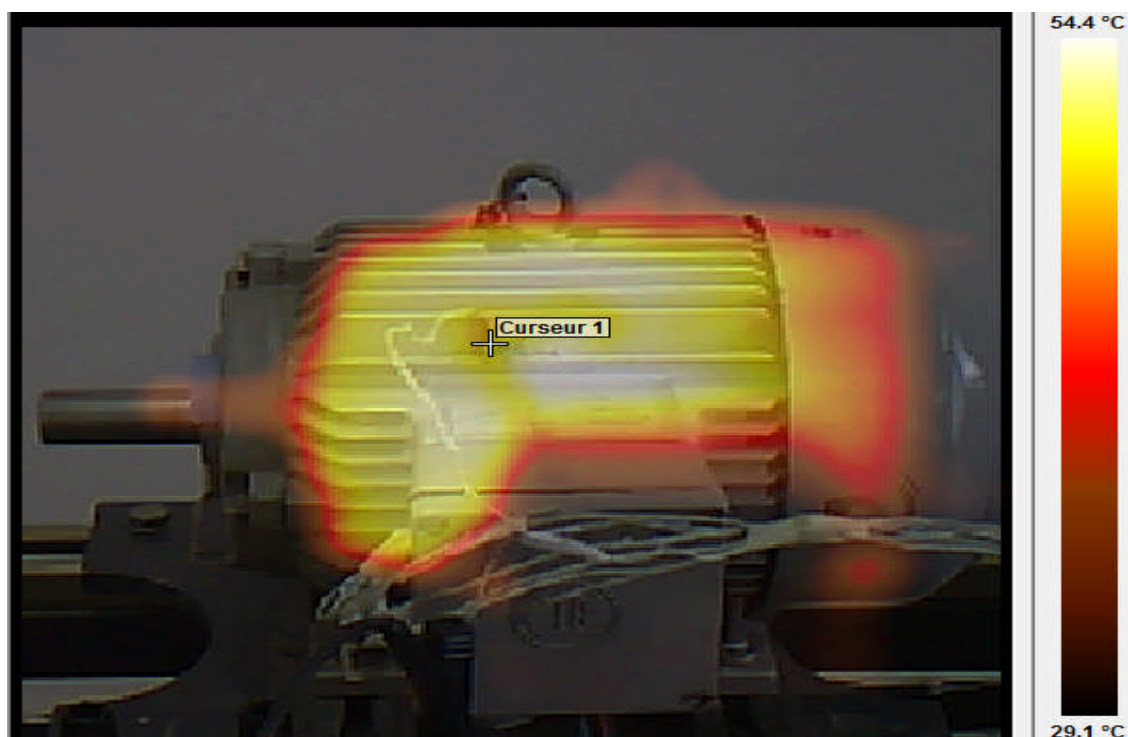


Fig. IV.10.b. Image de l'échauffement extérieur du moteur

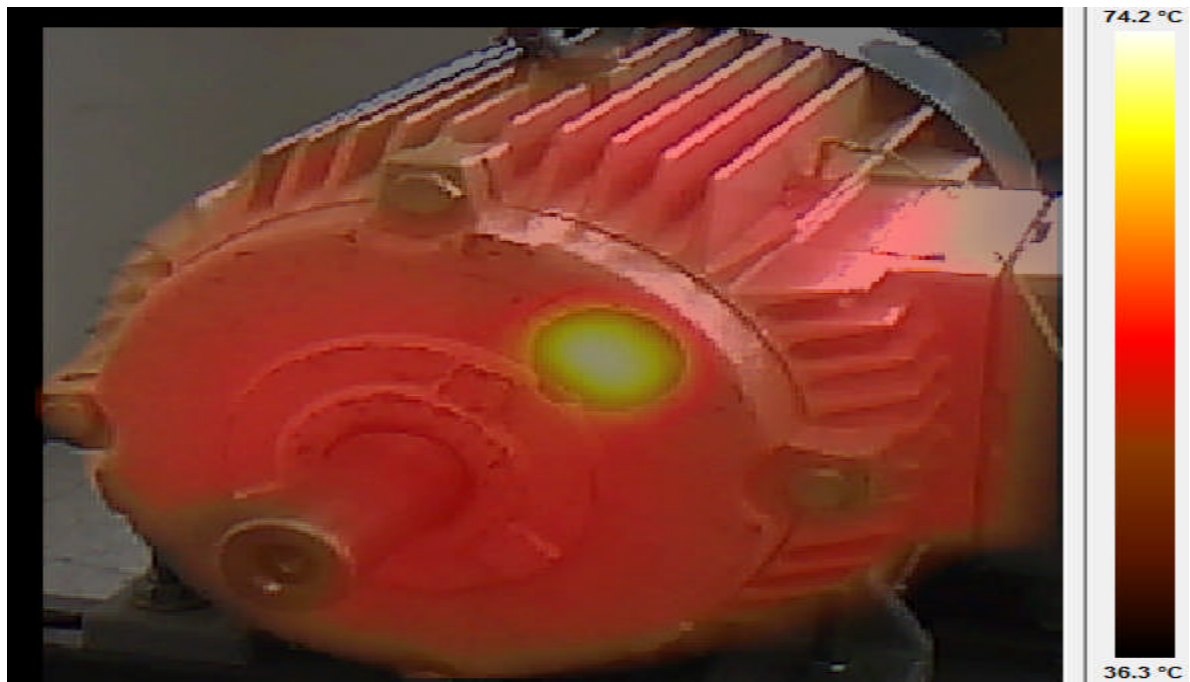


Fig. IV.10.c. Image correspondant à l'échauffement du rotor

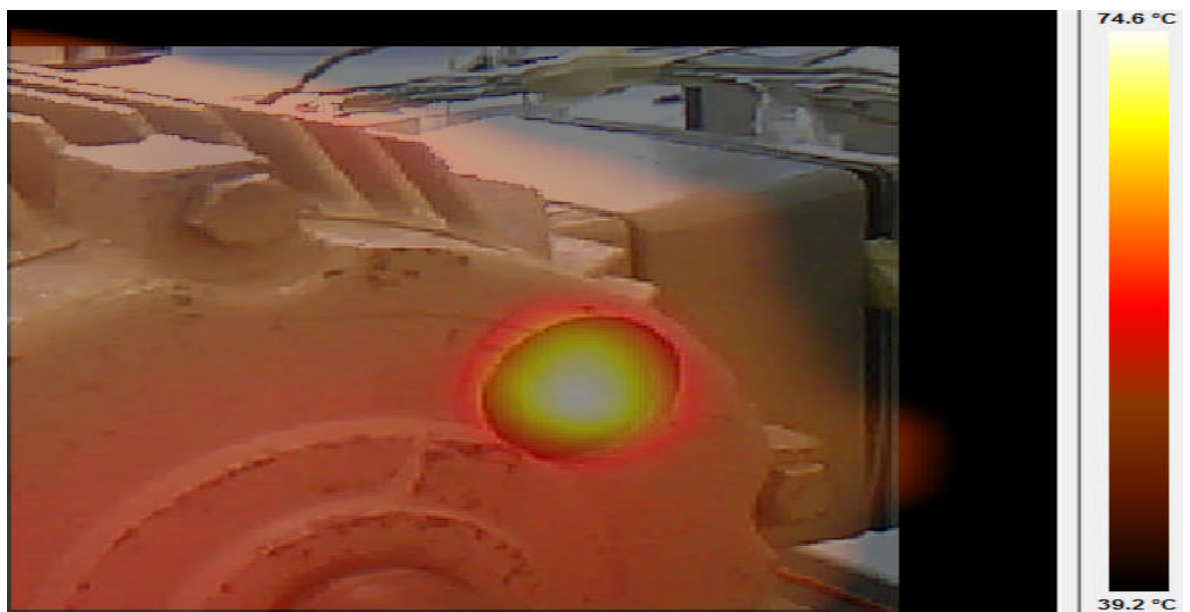


Fig. IV.10.d. Image correspondant à l'échauffement des têtes de bobine

IV.8.1.1. Observations

Au cours de cet essai les températures augmentent brusquement et l'équilibre thermique est atteint au bout de 98 minutes (régime permanent).

La différence de température entre la zone la plus chaude (têtes de bobine côté non ventilé) et l'air ambiant est de 52°C.

La différence de température entre la zone la plus chaude (têtes de bobine côté non ventilé th5) et la moins chaude (la surface extérieure de la carcasse th8) est de 26°C

On a arrêté l'essai après 42 minutes (l'état d'équilibre est atteint), et on a remarqué que la température baisse dans les différentes zones sauf celle de la carcasse qui augmente de 47.9°C à 56.1°C (+9°C) et celle du rotor th4 qui a aussi augmentée de 3°C.

Pour ce qui concerne la camera thermique on voit qu'elle a indiqué des zones de température atteignant :

- ✓ 54.4°C sur la carcasse (la température exacte au point où est placé le thermocouple (th8) est de 50.9°C).
- ✓ 74.2°C au rotor
- ✓ 74.6°C sur les têtes de bobine côté non ventilé (th5).

Comme c'est indiqué sur les **figures 10 (b, c, d)**

Notons que le moteur durant cet essai absorbe une puissance de 480 W, correspondant à une vitesse de rotation de 1498 tr/min, un courant de 3.7 A et une tension de 396 V.

VI.8.2. Essai du moteur en charge nominale

Dans cet essai le moteur fonctionne en régime nominale, l'essai permet l'étude de l'échauffement pendant ce régime, ainsi que l'observation de l'évolution de sa température qui est mesurée pour un couple $C_n = 14\text{Nm}$.

Le schéma de montage est représenté par la figure (IV.11).

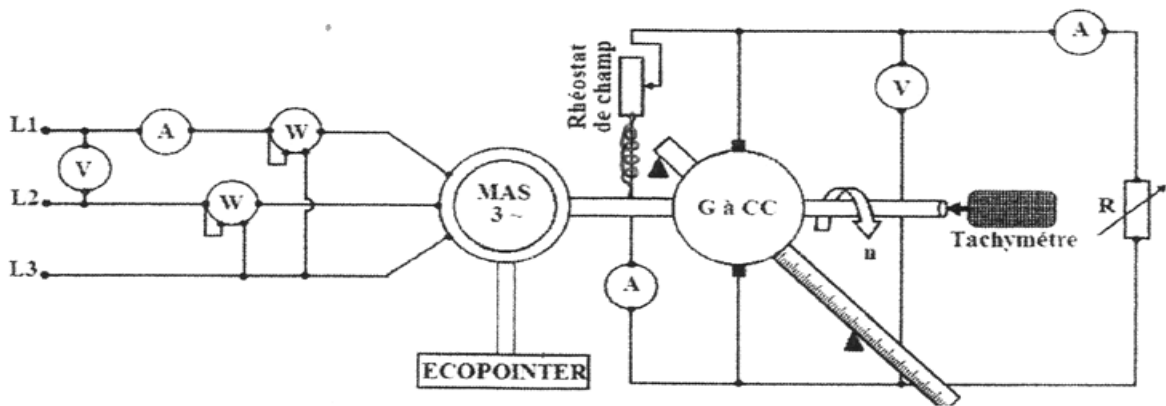


Fig. IV.11. Schéma du montage de l'essai en charge nominale

Les résultats obtenus durant cet essai sont illustrés par les figures (IV.12. a, b, c, d).

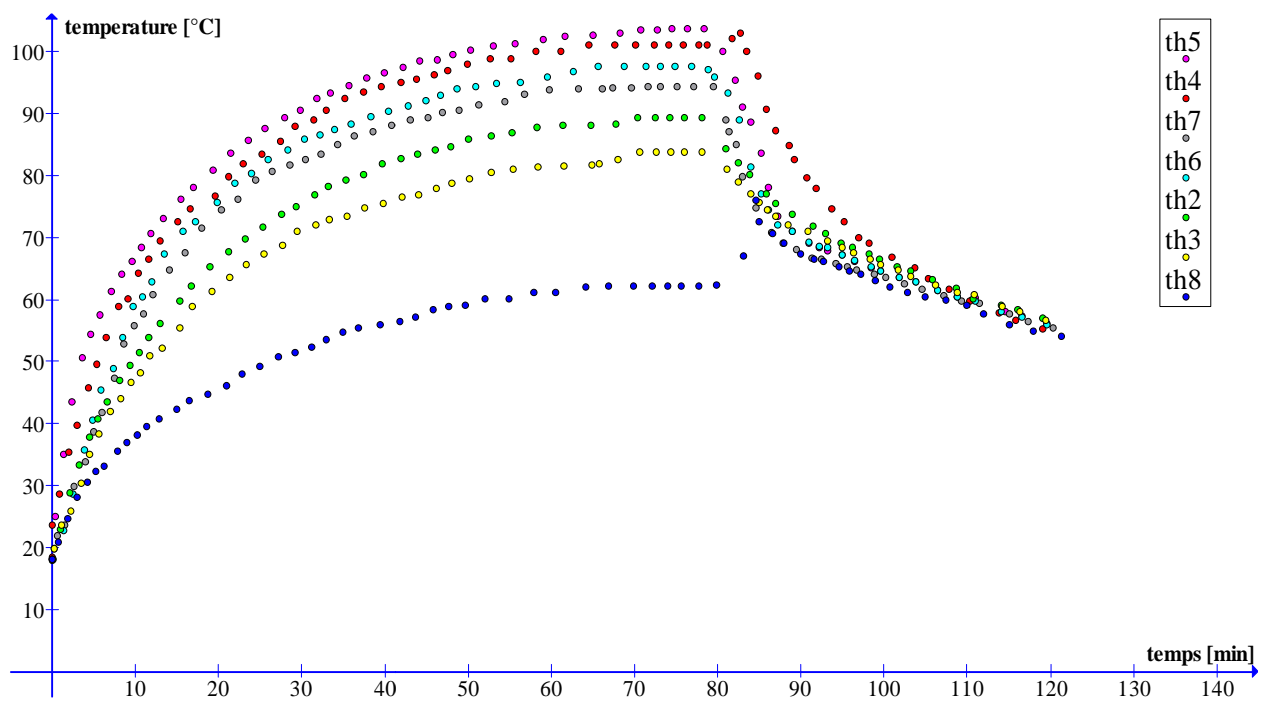


Fig. IV.12.a. Echauffement du moteur en charge nominale ($T_{ai}=22^{\circ}\text{C}$, $T_{af}=22^{\circ}\text{C}$)

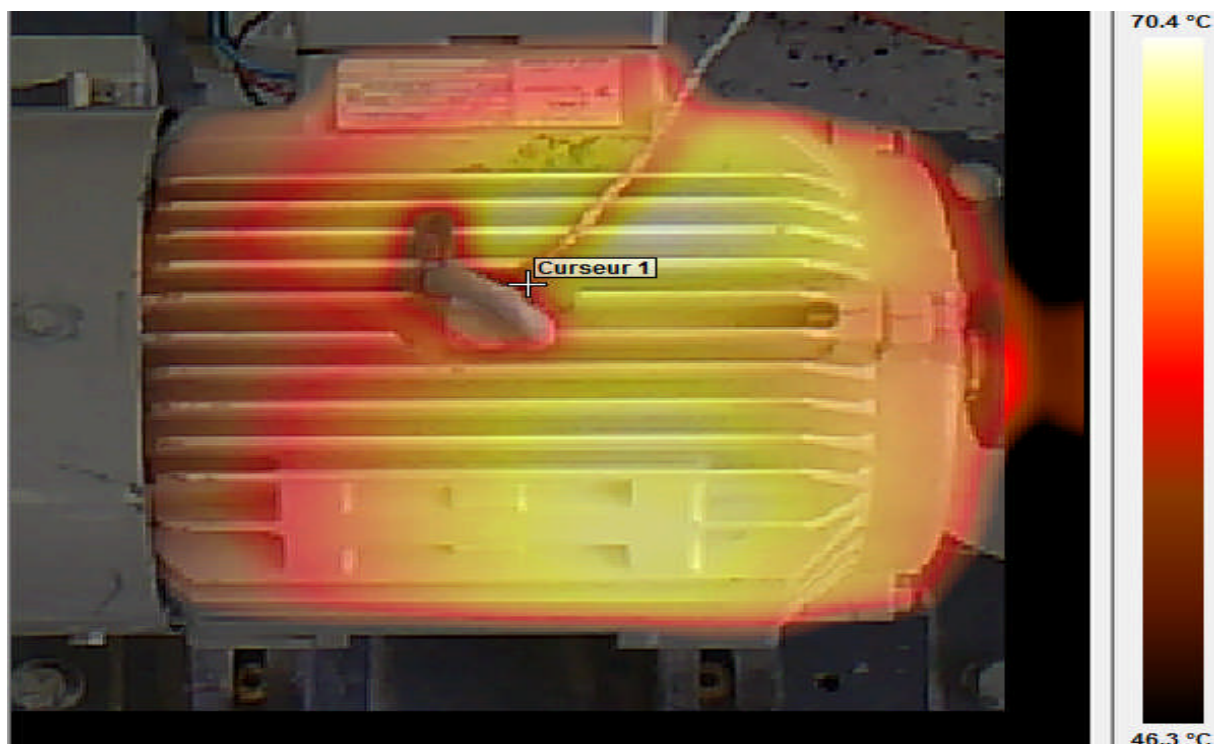


Fig. IV.12.b. Image de l'échauffement extérieur du moteur

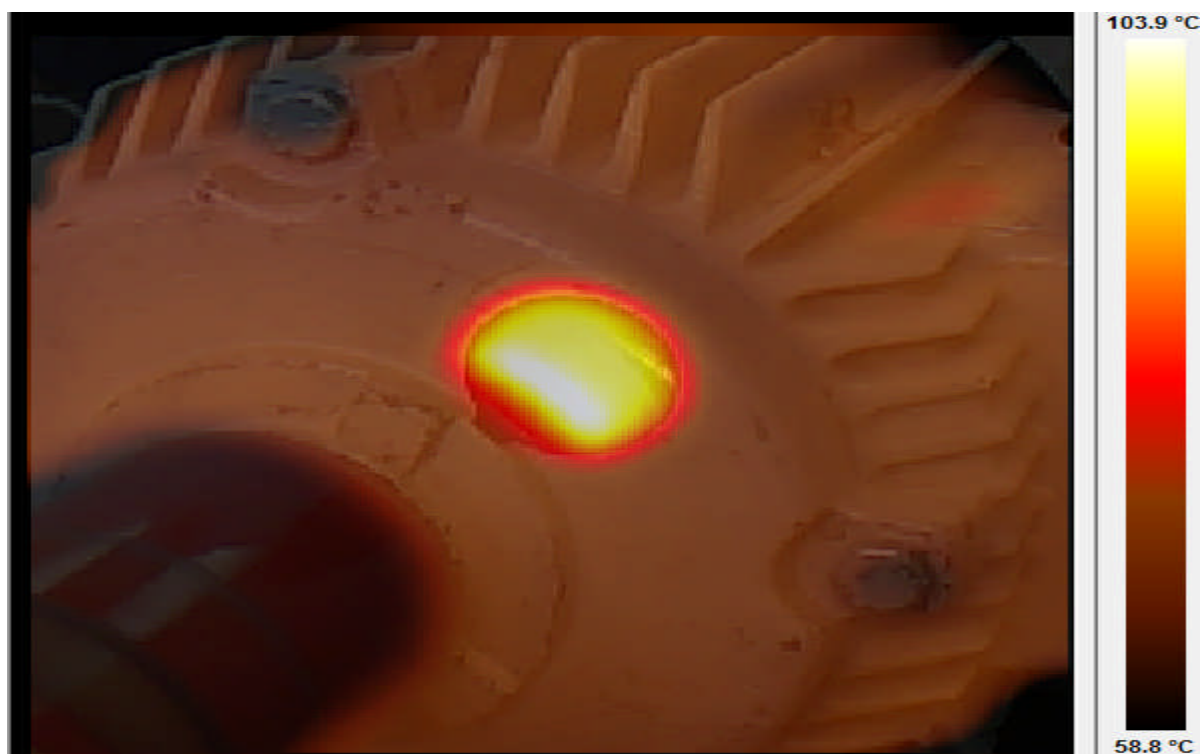


Fig. IV.12.c. Image correspondant à l'échauffement du rotor



Fig. IV.12.d. Image correspondant à l'échauffement des têtes de bobine

IV.8.2.1. Observations

L'écart de température entre le thermocouple th5, l'air ambiant et celle de la carcasse th8 sont respectivement de 81.6°C et 41.4°C

Après 70 minutes de fonctionnement, la température commence à s'établir, on a attendu encore 20 minutes avant d'arrêter la machine. Les températures des différentes zones baissent à part celle de la carcasse qui continue à augmenter pendant un certain temps (+10.4°C) et celle du rotor (th4) qui elle augmente de 2°C, puis elles diminuent pour rejoindre les autres températures des autres thermocouples qui se stabilisent autour de la température ambiante comme la montre la figure (**fig. IV.12.a**).

Pour ce qui concerne l'observation avec la camera thermique on voit qu'elle a indiqué des zones de température atteignant :

- ✓ 70.4°C sur la carcasse (62.8°C exacte sur th8) ;
- ✓ 103.8°C au rotor ;
- ✓ 104°C sur th5.

La puissance absorbée est de 2590W pour un courant de 5.23A, une tension de 410V et une vitesse de 1435tr/min

VI.8.3. Essai en demi-charge nominale

Le montage de cet essai est le même avec celui de l'essai en charge nominale, avec un couple de 7Nm et $T_{ai}=21^{\circ}\text{C}$ et $T_{af}=22^{\circ}\text{C}$.

Les résultats obtenus avec les deux méthodes de mesure sont donnés par les Figures (IV.13. a, b, c, d).

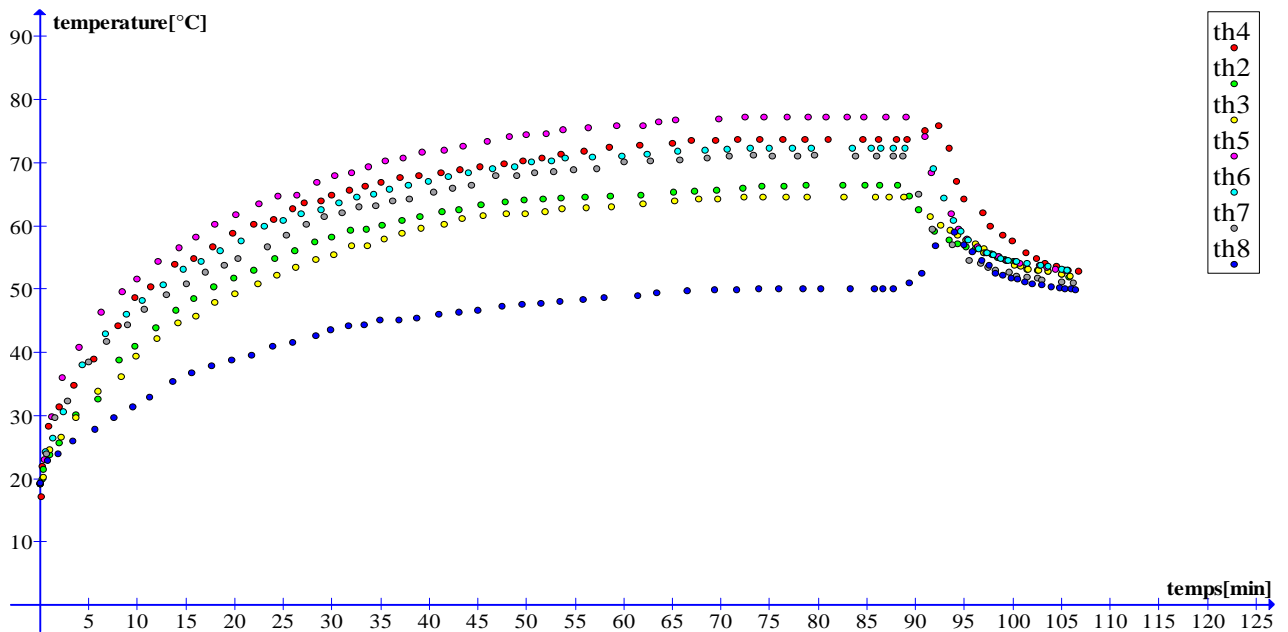


Fig. IV.13.a. Echauffement du moteur en demi-charge

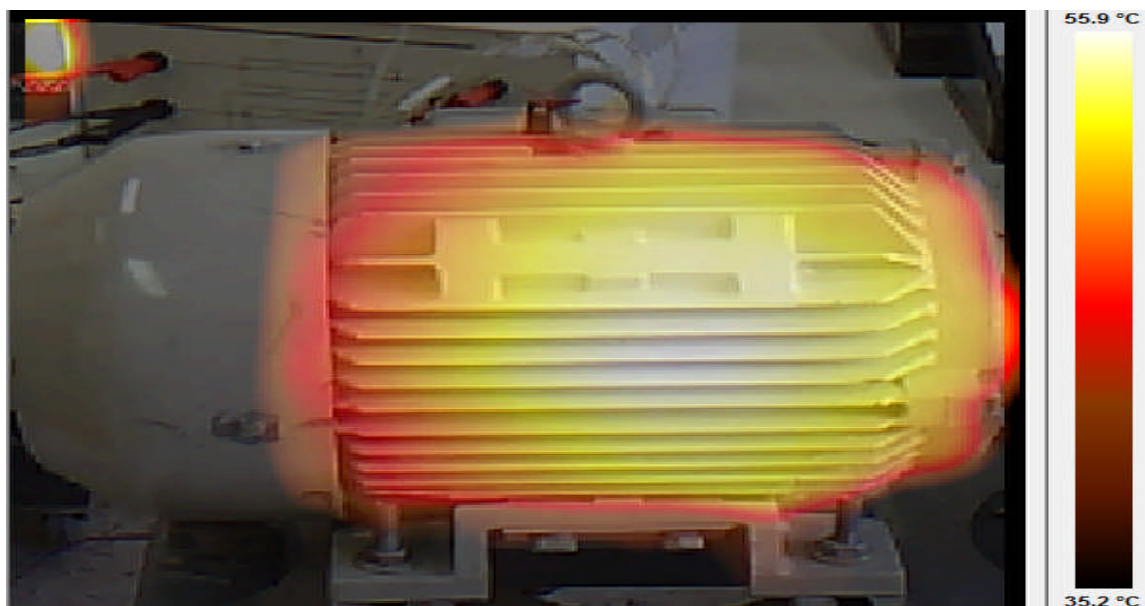


Fig. IV. 12. b. Image de l'échauffement extérieur du moteur

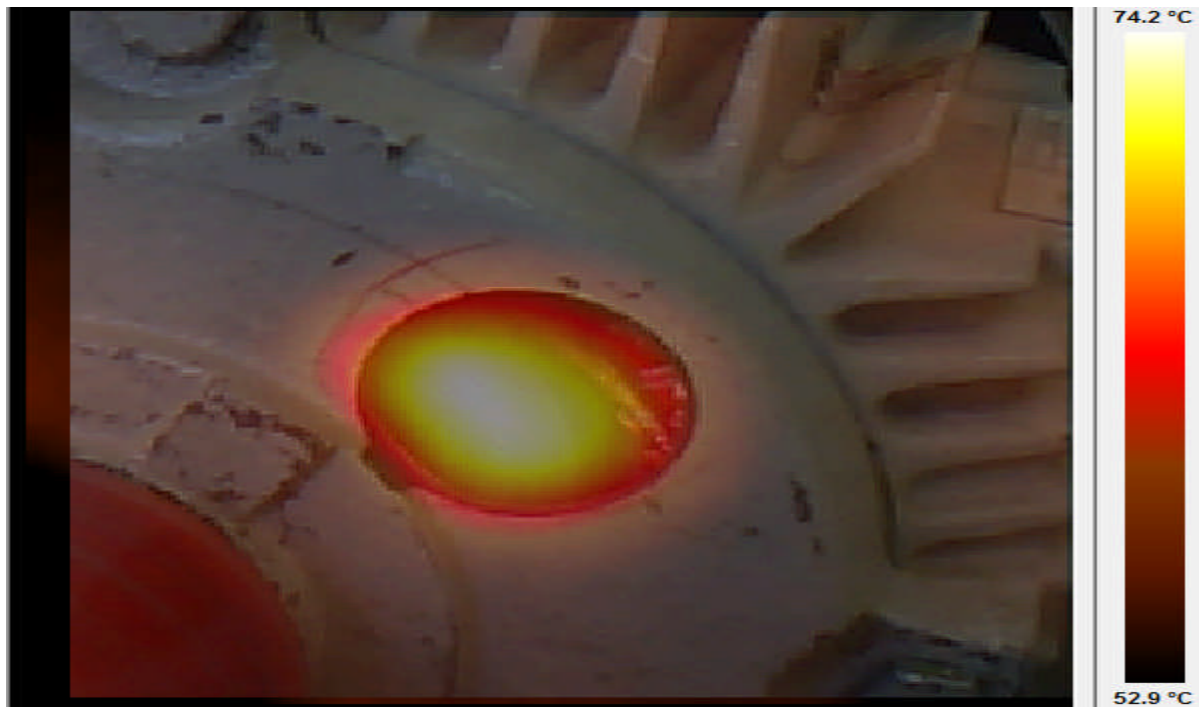


Fig .IV. 12. c. Image correspondant à l'échauffement du rotor



Fig .IV. 12. d. Image correspondant à l'échauffement des têtes de bobine

IV.8.3.1. Observations

Nous constatons durant cet essai que l'écart de température entre le point le plus chaud et le milieu ambiant est 56.3°C et entre le point le plus chaud et le moins chaud de la machine est de 27.3°C .

On a aussi constaté que le régime permanent est atteint au bout de 92 minutes de fonctionnement où la température commence à s'établir (les standards définissent le régime permanent thermique comme étant la variation de la température de moins de $0,5^{\circ}\text{C}$ dans trente minutes.). On a laissé la machine fonctionner pendant 18 minutes avant de l'arrêter. Les mêmes observations sont faites comme pour l'essai en pleine charge comme le montre la figure (**fig. IV.13.a**).

Avec la camera, on voit sur la carcasse une température de 55.9°C , 74°C au rotor et 77.4°C sur les têtes de bobines (**figures .IV.13 b .c. d**).

Durant cet essai le moteur tourne à une vitesse de 1471 tr/min et absorbe une puissance de 1440W, un courant de 4.5A et une tension de 405 V.

Toutes les photos qu'on a prise avec la camera durant les trois essais précédents ont été effectuées en régime permanent.

On a réglé la camera à 50% image thermique et 50% image normale, et les températures sur ces photos sont représentées par différents niveaux de couleurs et à côté de chaque figure on trouve une échelle qui identifie les températures qui correspondent à ces différentes couleurs.

Comme on peut utiliser une échelle numérique servie par des curseurs qui peuvent nous donner les valeurs numériques des températures captées à des points spécifiques.

IV.8. Interprétation des résultats

En analysant les résultats présentés dans le paragraphe précédent pour les trois types de charges à vide, demi-charge et charge nominale nous pouvons faire des constatations que nous essayons d'interpréter avant de tirer les conclusions qui en découlent.

1. Les points situés du côté non ventilé de la machine sont les plus chauds comparés à ceux du côté ventilé. Ceci est prévisible, il s'explique essentiellement par les conditions de refroidissement non uniformes à l'intérieur de la machine du côté ventilé et du côté non-ventilé.
2. Les têtes de bobine saturique côté non ventilé (th5) représentent le point le plus chaud. On peut expliquer ceci par le fait que les pertes Joule occupent le plus grand pourcentage des pertes globales dans les machines électriques en plus des pertes supplémentaires dues au flux de fuites d'extrémités et d'inclinaison qui accentuent

l'échauffement en ce point. Le rotor (th4) vient en deuxième position, puis l'encoche statorique, en suite les têtes de bobine côté ventilé (th7), la dent statorique (th2) et l'entrefer (th3), et en fin la carcasse (th8).

Notons que les températures enregistrées par les thermocouples placés aux extrémités de la partie active de la machine ne sont pas les températures maximales [19], car des études ont montré que le point le plus chaud du stator est situé à la demi-longueur axiale de ce dernier comme le montrent les figures (**fig. IV.10.b, fig. IV.11.b, fig. IV.12.b, fig. IV.13. b**).

3. La température du rotor vient en deuxième position après les têtes des bobines statoriques. Ceci ne correspond pas aux résultats trouvés par d'autres chercheurs ni à la théorie qui considère que le point le plus chaud dans une machine électrique est bien le rotor. Ce résultat peut être interprété par la présence du trou qu'on a percé sur le flasque de la machine. En effet, avec ce trou la carte thermique du moteur fermé auto-ventilé change complètement. Ceci est au préalable prévisible mais la mesure de température en utilisant la caméra thermique nous a contraint à cette solution qui apparemment n'est pas la bonne solution et ne règle pas le problème.
4. L'augmentation de la température du rotor à chaque fois qu'on l'arrête peut être interprété par deux possibilités, la première réside dans le fait de faire passer le signal du thermocouple via un système balais-collecteur et tous les bruits de mesure engendrés. Ceci peut donner des mesures erronées ce qui veut que th4 ne donne pas les vrais températures du rotor. La seconde possibilité est l'influence du trou et donc l'altération des transferts chaleur en ce point.
5. En comparant les courbes données par les figures des différents essais, nous constatons que l'échauffement de la machine n'obéit pas à une loi additive par rapport à la charge. Ce résultat confirme ainsi, que la relation entre l'échauffement et les pertes est non linéaire. Ceci est dû à la non uniformité du refroidissement et des transferts de chaleur mis en jeu ainsi qu'à la complexité de la géométrie des machines électriques.
6. D'après les essais qu'on a faits et les études qui ont traité cette partie de la machine, on constate que la température du milieu ambiant influe sur l'échauffement.
7. L'augmentation de la température au niveau de la carcasse (th8) après l'arrêt de la machine peut être expliquée par l'importante différence de température entre les parties internes (les plus chaudes) et les parties externes (les moins chaudes) provoquant un transfert de chaleur important vers l'extérieur, élevant ainsi les températures de la carcasse pour des courts moments après l'arrêt de la machine.
8. En ce qui concerne les résultats qu'on a obtenus avec la camera thermique, ils sont comparables aux températures mesurées par les thermocouples à quelques degrés de différence (2°C à 3°C). Cependant, le sérieux problème qu'on a rencontré durant l'utilisation de la camera thermique c'est qu'on ne peut pas avoir les températures à l'intérieur du moteur. Ceci limite les avantages que peut apporter cette nouvelle technique de mesure de température dans le cas des études thermiques des machines électriques.

IV.9. Conclusion

Pour effectuer une mesure de température, il est nécessaire de bien connaître le milieu qu'on désire contrôler, ainsi que l'environnement immédiat. Comme il est important de connaître les modes de transfert de chaleur, les zones actives dans la machine, le mode de fixation des thermocouples, la température maximale du milieu, le menu et le réglage pour la camera thermique.

L'échauffement d'une machine dépend des pertes qui apparaissent sous forme de chaleur, ce qui explique que les sources de chaleur se trouvent à l'intérieure de la machine où ces pertes sont importantes. Malheureusement, la nouvelle technique de mesure de température qu'on a expérimentée dans ce mémoire à savoir l'utilisation d'une caméra thermique ne permet pas de donner des informations sur la répartition des températures à l'intérieure du moteur ce qui limite considérablement l'intérêt de son utilisation dans l'étude thermique des machines électriques, laissant encore le champ ouvert à d'autres investigations surtout pour la distribution de la température au rotor qui représente le point le plus chaud de la machine.



**CONCLUSION
GENERALE**

Le but de notre présent travail est l'étude du comportement thermique d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil, en utilisant deux méthodes expérimentales ; la camera thermique et les thermocouples.

Nous avons commencé par la présentation des différentes pertes existantes dans les machines électriques tournantes; une connaissance exacte de la distribution de ces pertes est indispensable pour le calcul de la température. En suite, on a présenté les divers modes de transfert de chaleur ainsi que leurs lois générales.

Dans le troisième chapitre on a étudié les principales méthodes utilisées pour déterminer l'échauffement dans les machines asynchrones pour ensuite choisir l'approche expérimentale pour déterminer la distribution de température dans le moteur en utilisant les thermocouples et en utilisant une caméra thermique. Il faut noter que l'utilisation de cette dernière est expérimentée pour la première fois au niveau de notre laboratoire.

Les résultats expérimentaux obtenus montrent que les têtes de bobine côté non ventilé sont les plus sensibles aux élévations de température. Ceci n'est pas concordant avec les résultats publiés dans la littérature spécialisée qui considère le rotor comme étant la partie la plus chaude du moteur « hot spot ». Cette anomalie a été interprétée par le trou percé dans le flasque qui a complètement altéré la carte thermique du moteur.

L'échauffement d'une machine dépend des pertes qui apparaissent sous forme de chaleur, ce qui explique que les sources de chaleur se trouvent à l'intérieure de la machine où ces pertes sont importantes. Malheureusement, la nouvelle technique de mesure de température qu'on a expérimentée dans ce mémoire à savoir l'utilisation d'une caméra thermique ne permet pas de donner des informations sur la répartition des températures à l'intérieure du moteur ce qui limite considérablement l'intérêt de son utilisation dans l'étude thermique des machines électriques laissant encore le champ ouvert à d'autres investigations surtout pour la distribution de la température au rotor qui représente le point le plus chaud de la machine.



BIBLIOGRAPHIE

- [1] **D. ROYE**, « Modélisation thermique des machines électriques tournantes : application à la machine à induction », Thèse de doctorat, INP, Grenoble (France), 1983.
- [2] **S. MEZANI**, « Modélisation électromagnétique et thermique des moteurs à induction, en tenant compte des harmoniques d'espace », Thèse de Doctorat à l'INPL 2004.
- [3] **M. OUNNADI, R. SARAOUI**, « Modélisation d'un moteur asynchrone à cage de puissance 4 kW avec la méthode des éléments finis », mémoire d'ingénieur, U.M.M.T.O, 2004.
- [4] **M. BOUHERAOUA**, « Contribution à la modélisation thermique d'un moteur asynchrone à cage », mémoire de magister, U.M.M.T.O, 2001.
- [5] **B. CHERON**, « Transferts thermiques », ellipses / édition marketing S.A. (PARIS), 1999.
- [6] **D. SATOR-NAMAN**, « Machines à courant alternatif », ellipses / édition marketing S.A., 2010.
- [7] **M. BOUHERAOUA**, « Contribution à la modélisation thermique d'un moteur asynchrone à cage », Thèse de doctorat, U.M.M.T.O, 2008.
- [8] **A. BASAID, A. BOUZOUAR, M. SEGHIR**, « Modélisation des contraintes thermiques d'un moteur asynchrone à cage sous FEMM », mémoire d'ingénieur, U.M.M.T.O, 2011.
- [9] **B. EYGLUNENT**, « Manuel de thermique », 2^e édition revue et augmentée, PARIS, Hermès science publications, 1997.
- [10] **MOHAND LAID IDOUGHI**, « Extraction de modèles thermiques simplifiés des machines électriques à partir d'un calcul du champ de températures », Thèse de doctorat, Université Paris Sud, 2011.
- [11] **D. MOULAI ZAZI**, « Contribution à l'étude thermique des machines asynchrones par des convertisseurs électroniques », Mémoire de magister, U.M.M.T.O, 2002.
- [12] **N. BENAMROUCHE**, « An investigation of the loss distribution in induction motors fed from non sinusoidal supplies », Phd Thesis, university of Sheffield, 1990.
- [13] **J. F. SACADURA**, « Initiation aux transferts thermiques », 4^{ème} tirage 1993 Technique et Documentation, (Paris), 1980.
- [14] **M. AZZOUG, M. ZERIFI**, « Etude expérimentale de l'échauffement d'un moteur asynchrone à cage de puissance 7,5kW », mémoire d'ingénieur, U.M.M.T.O, 2003.

- [15] **G.TOUZOT. G.DHATT**, « Une présentation de la méthode des éléments finis », Edition Maloinés, Paris (France), 1984.
- [16] **M. LIWSHITZ, L. MARET**, « Calcule des machines électriques », Tom I et II, Edition SPES, Lausanne (Suisse), 1997.
- [17] **S. MEZANI**, «Etude expérimentale de l'échauffement d'un moteur asynchrone alimenté par un convertisseur ». Mémoire d'ingénieur, U.S.T.H.B (Alger), 1996.
- [18] **N. DAFFEUR**, «Modélisation thermique par éléments finis d'un moteur asynchrone à cage ». Mémoire de magister, U.M.M.T.O, 2010.
- [19] **N. HARIRECHE, A. IMERZOUKENE**, « Etude expérimentale de l'échauffement d'un moteur asynchrone ». Mémoire d'ingénieur, U.M.M.T.O, 2000.
- [20] **H. ABEDLLAOUI**, «Modélisation thermique d'un moteur asynchrone à cage par la méthode des éléments finis». Mémoire d'ingénieur, U.M.M.T.O, 2007.