

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'Etudes de MASTER PROFESSIONNEL

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Présenté par
KHALED MEDANE

Thème

MESURE DE LA TEMPERATURE DANS LE ROTOR D'UNE MACHINE ASYNCHRONE A CAGE

Mémoire soutenu publiquement le 28 Septembre 2014 devant le jury composé de :

M Mohand Tahar BELASSEL

Maître de Conférence Classe A, Université mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou, Président

M Rabah KHALDI

Maître Assistant Classe A, Université mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou, Rapporteur

M Youcef BOUTORA

Maître de Conférence classe A, Université mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou, Examineur

M Abdelghani KIMOUCHE

Maître Assistant Classe A, Université mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou, Examineur

Remerciements

La rédaction de cet ouvrage nous a permis de trouver un espace pour exprimer nos remerciements avec infiniment de reconnaissance et de respect envers tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la maîtrise du sujet.

Nous tenons à exprimer nos plus grands remerciements notamment envers notre promoteur Mr. Khaldi R. qui nous a aidés tout au long de notre travail, et le prion de bien vouloir trouver ici l'expression de notre profonde gratitude.

Nos remerciements s'adressent aussi aux membres de jury pour avoir accepté de nous honorer par leur présence à l'exposer de notre travail

Dédicaces

Je dédie mon modeste travail à :

- ❖ Mes chers parents qui m'ont toujours soutenu, encouragé et aidé ;
- ❖ Mes frères et mes sœurs
- ❖ Ma grand-mère 'FATIMA'
- ❖ Mes cousines, cousins et tout la famille ;
- ❖ Tous mes amis sans exception
- ❖ A la mémoire de mes frères 'HADJIRA, ALI'

Kh. MEDANE

SOMMAIRE

Introduction Générale	1
------------------------------------	---

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES PERTES DANS UNE MACHINE ASYNCHRONE.

I-1-introduction	2
I-2 –les pertes dans le circuit électrique	2
I-3- les pertes dans le circuit magnétique.....	3
I-3-1- perte par hystérésis	3
I-3-2 pertes par courant de Foucault.....	4
I-4 -Pertes mécaniques	4
I-4-1- les pertes par frottement dans les roulements.....	4
I-4-2-les pertes par ventilation.....	5
I-5 pertes supplémentaires.....	5
I-6conclusion.....	7

CHPITRE II : MODES DE TRANSFERT DE CHALEUR ET METHODES D’ETUDE THERMIQUE.

II-1Introduction	8
II-2-Transfère de chaleur par conduction.....	8
II-2-1 Relation de fourrier	8
II-2-2 La conductivité thermique.....	9
II-2-3 Conductivité thermique des solides hétérogènes	9
II-2-3-1 Association parallèle	11
II-2-3-2 Association série	12
II-3- Transfert de chaleur par convection.....	13
II-3-1Convection naturelle et convection forcée	13
II-4 Transfert de chaleur par rayonnement.....	13
II-5 Echange thermique dans une machine électrique	14
II-6 Méthodes d’étude thermiques	16
II-6-1 Méthode expérimentales	16
II-6-1-1 Méthode calorimétrique	16
II-6-1-2 Mesure de température par des capteurs	17
II-6-1-3 Par caméra infrarouge	17
II-6-2 Méthode théorique.....	18
II-6-2-1 Méthode nodale	18
II-6-2-2 Méthodes numériques	20
II-6-2-2-1 Méthode des différences finies	20
II-6-2-2-2 Méthode des éléments finis.....	20
II-7 Conclusion	21

CHAPITRE III : MOYEN DE MESURE DE TEMPERATURE DANS UNE MACHINE ELECTRIQUE.

III-1 Introduction	22
III-2 Méthode de mesure de température par contact directe.....	22
III-2-1 les thermocouples.....	23
III-2-1-1 constitution et principe.....	23
III-2-1-2 la température de référence d'un thermocouple	23
III-2-1-3 Caractéristique	25
III-2-1-4 Critères de sélection du thermocouple.....	25
III-2-1-5 Avantage et inconvénient des thermocouples.....	25
III-2-2 Les thermistances.....	26
III-2-2-1 Constitution et principe.....	26
III-2-2-2 Avantages et inconvénient des thermistances.....	27
III-2-3 Comparaisons entre les thermocouples et les thermistances	27
III-3 Méthode de mesure de température sans contact.	27
III-3-1 Pyrométrie optique.....	27
III-3-1-1 Principe physique.....	28
III-3-2 Camera thermique.....	28
III-3-3- Avantages et inconvénients de la caméra thermique.....	28
III-4 mesure de la température sur des corps en mouvement.....	29
III-5- Conclusion	29

CHAPITRE IV : MESURE EXPERIMENTALE DE LA TEMPERATURE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE.

IV-1 Introduction.....	30
IV-2 Présentation de la machine d'étude	31
IV-3 Description du banc d'essai	31
IV-4 Description de l'enregistreur de température	32
IV-5 L'emplacement des capteurs dans la machine asynchrone.....	33
IV-6 Mesures Préliminaires	34
IV-6-1 Etalonnage des appareils de mesure de température	34
IV-6-1-1Présentation et principe de fonctionnement du four.....	34
IV-6-1-2 Principe de l'essai.....	35
IV-6-1-3 Observation.....	36
IV-6-2 mesure de la température avec un thermocouple assemblée au conducteurs de nature différente	36
IV-6-3 Influence de système bagues balais sur la mesure de température.....	37
IV-6-3-1 A l'arrêt	37
IV-6-3-2 en rotation	37
a-Avec un thermocouple	37
a-1-Principe de l'essai.....	37
a-2-Schéma de montage.....	37

b-Avec deux thermocouples à la fois	38
b-1 Principe de l'essai	38
IV-6-4 Mesure préliminaire sur la machine	40
IV-6-2-1 Vérification de l'état de contact des capteurs au niveau des têtes de bobine	40
IV-6-4-2 Incidence trou percé sur la flasque	40
IV-7 Différents essais expérimentaux effectués sur le moteur	40
IV-7-1 Essai à rotor bloquée	40
IV-7-1-1 les capteurs rotorique reliés directement à l'appareil de mesure	41
a-principe de l'essai	41
b-schéma de montage	41
c-observation	42
IV-7-1-2 les capteurs reliés à l'appareil de mesure à travers le système bagues balais	42
a-Principe de l'essai	43
b-observation	44
IV-7-2 Essai à vide	45
a-Principe de l'essai.....	45
b-schéma de montage	45
c-correction des capteurs rotorique	46
d-observation	47
IV-7-3 Essai en charge nominale.....	48
a-principe	48
b-schéma de montage.....	48
c- Correction des capteurs rotorique	49
d-Observation	50
IV-8 Mesure de l'échauffement rotorique par la caméra infrarouge	51
IV-8-1 présentation de la caméra infrarouge	51
IV-8-2 Essai en cour circuit	54
a-Observation	56
IV-8-3 essai à vide et en charge avec camera	57
a-essai à vide	57
a-1-Observation.....	57
b- essai en charge	58
b-1-Observation	59
IV-9 Interprétation des résultats.....	59
IV-10 Conclusion	60
Conclusion Générale.....	60
BIBLIOGRAPHIE.....	61
ANNEXES 'A'	62
ANNEXES ' B'	63

Introduction générale

Introduction générale

L'utilisation des machines électriques à courant alternatif, s'est accrue depuis des dizaines d'années, grâce au développement de l'électronique de puissance et la commande numérique. Ce là, a permis la présence de ce type de machines, en particulier la machine asynchrone, dans de nombreux secteurs industriels.

Cette croissante utilisation de ce type de machine dans les divers domaines industriels est dû à sa robustesse mécanique et son faible coût d'achat.

Dans une machine asynchrone la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique s'accompagne de perte de divers type (joule, hystérésis, courant de Foucault, mécanique). Ces pertes deviennent la source de chaleur dans la machine, le comportement et le transfert de cette chaleur dépend du régime de fonctionnement de la machine, du type d'alimentation, des conditions ambiantes et du refroidissement. Il en résulte, pour des conditions sévères de fonctionnement, des échauffements excessifs qui ont pour conséquence la dégradation de l'isolation des conducteurs et des parties tournantes (roulement, palier ...).

Pour ces raisons l'étude du comportement thermique et la connaissance de la température en tout point de la machine, devient indispensable.

Les méthodes théoriques telles que la modélisation thermique, nodale ou élément finis, sont toutes basées sur des tests expérimentaux pour validation.

Pour ce là, on s'intéresse à la méthode expérimentale, basé sur des mesures de température, qui est indispensable dans toute étude thermique des machines électriques.

Notre travail consiste à la mesure expérimentale de la température dans les différentes parties d'une machine asynchrone à cage, en particulier dans le rotor.

Pour cela nous avons subdivisé notre travail en quatre chapitre

- Le premier est consacré aux rappels et généralité sur les pertes dans une machine asynchrone
- Le deuxième est réservé aux modes de transfert de chaleur et méthodes d'étude thermique
- Le troisième concerne les moyens de mesure de température dans une machine électrique
- Enfin, dans le quatrième nous présentons les différents essais effectués sur la machine.

Nous terminons par une conclusion générale.

CHAPITRE I :
GENERALITES SUR LES PERTS DANS
UNE MACHINE ASYNCHRONE

I-1-introduction :

Dans une machine asynchrone la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique s'accompagne de perte de divers type.

Les pertes dans une machine électrique peuvent être divisées en trois grands groupes [1] :

- Pertes dans le circuit électriques

(Enroulement du stator ; du rotor ; et plus généralement, dans toutes les parties conductrice d'une machine traversées par des courants électriques).

- Pertes dans le circuit magnétique

(Communément appelées pertes fer : par hystérésis et par courants de Foucault).

- Pertes mécaniques

(Pertes par frottement de roulement et pertes par ventilation).

Les pertes dus aux phénomènes principaux particulièrement celles qui correspondent aux courant et flux à fréquence fondamentale, appelées pertes normale, elles sont présentes à vide ou en charge.

Celles qui correspondent aux phénomènes parasites (aux flux de fuite même à fréquence fondamentale ou aux courants et flux de fuite à fréquence harmonique) sont appelées pertes supplémentaires[6].

I-2 –les pertes dans le circuit électrique :

Ce sont les pertes par effet joule induites dans les parties conductrices de la machines parcourue par des courants. Ces pertes sont localisées dans l'enroulement d'excitation du stator, et dans la cage d'écureuil du rotor [2].

Tout conducteur de résistance R parcouru par un courant électrique de valeur efficace I et l'objet des pertes pare effet joule valent en (W) :

$$P_j = RI^2 \quad (I-1)$$

I-3- les pertes dans le circuit magnétique :**I-3-1- perte par hystérésis :**

Les pertes par hystérésis résultent de transformations de l'organisation de la matière sous l'effet de la variation en intensité et/ou en direction du champ magnétique appliqué.

Ces pertes sont en fonction du volume par unité de temps. Elles sont aussi en fonction du matériau utilisé et de la densité maximale du flux [3].

On les calcule par :

$$P_H = K_H \cdot f \cdot B_{\max}^2 \quad (\text{I-2})$$

Avec :

P_H : puissance perdue [W/kg].

K_H : coefficient des pertes par hystérésis.

B_{\max} : induction maximale [T].

f : fréquence [Hz].

En courant alternatif, le champ varie périodiquement entre deux limites égales et opposées. Lorsqu'on fait circuler régulièrement le champ magnétisant entre deux limites fixes, on constate qu'après une dizaine de cycles, l'induction finit par évoluer, elle aussi entre deux limites stables. L'ensemble décrit une courbe fermée appelée cycle d'hystérésis.

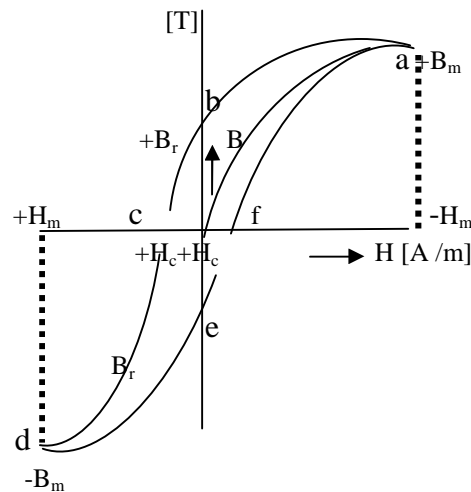


Fig-I-1 : cycle d'hystérésis d'un matériau magnétique [2].

A chaque cycle complet d'hystérésis, des pertes apparaissent. Les pertes sont dues aux frottements des domaines magnétiques durant le chargement de sens sous l'effet d'un champ magnétique extérieur. Ces pertes se transforment en chaleurs dans le fer ce qui augmente la température de la machine [2].

I-3-2 pertes par courant de Foucault :

Les pertes par courant de Foucault résultent des variations temporelles des flux qui induisent dans la masse du fer des f.e.m. ces dernières donnent naissance à des courants qui se referment dans la masse du fer [4].

L'expression qui nous permet de calculer ces pertes :

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

Avec:

P_F : pertes fer [W/kg]

k_F : coefficient caractéristique de la tôle

e : épaisseur de la tôle [m]

f : fréquence du champ tournant résultant

B_{max} : induction maximal [T]

Généralement Le moyen le plus utile pour diminuer ces pertes dans la masse de fer en utilisons de fer feuilleté.

Dans les machines électriques, les circuits magnétiques sont faits de tôles empilées, isolées électriquement les unes des autres à masse égale, les pertes sont proportionnelles au carré de l'épaisseur des tôles.

I-4 -Pertes mécaniques :

Les pertes mécaniques sont de multiples origines, et prennent en compte tous les frottements dus à la relation de la partie tournante de la machine, que ce soit des frottements entre solide ou entre solide et fluides [2].

I-4-1- les pertes par frottement dans les roulements :

Ces pertes sont dues aux contacts des corps roulants, aux mouvements du lubrifiant et du fluide, et des joints intégrés aux roulements. Ces frottements dépendent de nombreux facteurs à savoir : la charge appliquée sur le roulement, type de lubrification (graisse, injection d'huile), viscosité et type de géométrie du roulement [2, 3, 4].

I-4-2-les pertes par ventilation :

On appelle pertes par ventilation la puissance absorbée par le ventilateur monté en bout d'arbre de la machine qui est utilisé pour le refroidissement de la machine.

I-5 pertes supplémentaires [2] :

Ce sont les pertes dues à tous les phénomènes secondaires :

- conducteur :
 - ✓ par effet de peau
 - ✓ flux de fuites d'encoche et des têtes de bobines
 - ✓ inclinaison d'encoches et le contact entre les barres et les tôles
- tôle :
 - ✓ par effet pelliculaire aux fréquences élevées (harmonique de denture)
 - ✓ par effet d'extrémités dues aux flux de fuite des têtes de bobines
 - ✓ par discontinuités géométriques (pulsation de flux et différentiel d'encoche (zigzag))

L'estimation et la détermination expérimentale des pertes supplémentaires en charge sont l'un des problèmes les plus aigus dans la caractéristique des pertes du moteur asynchrone. Elles peuvent être définies comme la différence entre les pertes totales en charge de la machine et les pertes déterminées par la méthode de séparation des pertes.

$$P_{supp} = P_{tot} - (P_f + P_{mec} + P_{js} + P_{jr}) \quad (I-4)$$

Avec:

P_{supp} : pertes supplémentaire (W);

P_{tot} : pertes totales en charge (W);

P_f : pertes fer (W) ;

P_{mec} : pertes mécanique (W) ;

P_{js} : pertes joule statorique (W) ;

P_{jr} : pertes joule rotorique (W) ;

La figure ci-dessous illustre les différentes pertes dans une machine asynchrone a cage.

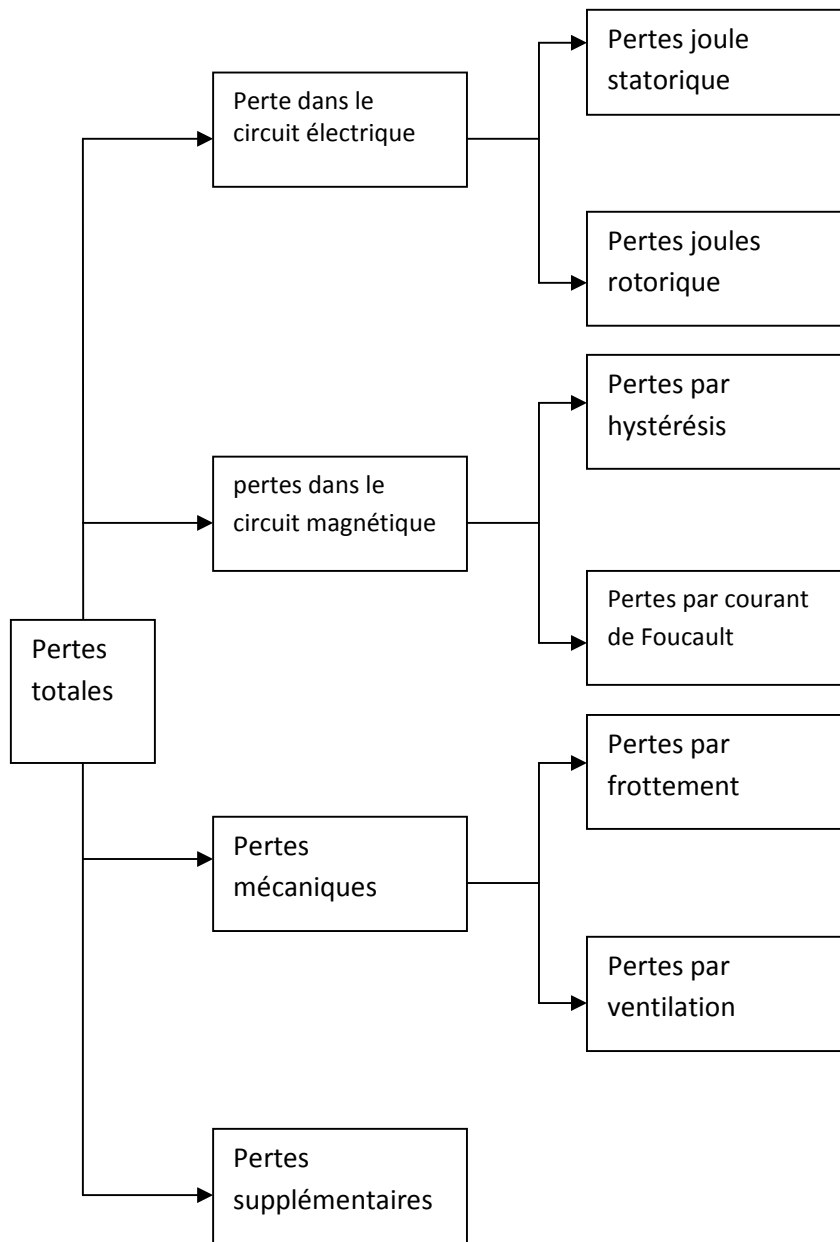


Fig. I.2 différentes pertes dans une machine asynchrone

I-6 conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes pertes qui se produisent dans une machine asynchrone, lors de son fonctionnement. Elles se manifestent sous forme d'une énergie calorifique qui se propage entre les différentes parties actives de la machine puis vers le milieu extérieur de la machine.

CHAPITRE II :

**MODE DE TRANSFERT DE
CHALEUR ET METHODES D'ETUDE
THERMIQUE**

II-1 Introduction :

La conversion de l'énergie électromécanique dans les machines électrique s'accompagne de pertes (électromagnétique et mécanique) qui se transforme 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 interne vers le milieu ambiant où la chaleur est cédée par convection et rayonnement [4].

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

II-2-Transfert de chaleur par conduction :

Le processus de conduction résulte d'un transfert de chaleur des parties d'un corps les plus chaudes vers les parties les plus froides. La température tend à s'uniformiser lorsqu'il n'y a pas de source de chaleur interne. Ce transfert est caractérisé dans un milieu homogène par la relation de Fourier [7].

II-2-1 Relation de fourrier :

La conduction est le mode unique de transfert de chaleur dans les solides. Dans un milieu homogène (fig II.1), soumise à un écart de température ($T_1 - T_2$) la puissance thermique transitant selon la direction X, s'exprime par :

$$\frac{d\phi}{dt} = -[\lambda] ds \overrightarrow{\text{grad}T} \quad (\text{II-1})$$

avec :

$\frac{d\phi}{dt}$ (w) : puissance d'échange thermique ;

$[\lambda]$ (w . m⁻¹ . k⁻¹) : tenseur de conductivité thermique du matériau ;

ds : (m²) surface d'échange perpendiculaire au flux (YZ) ;

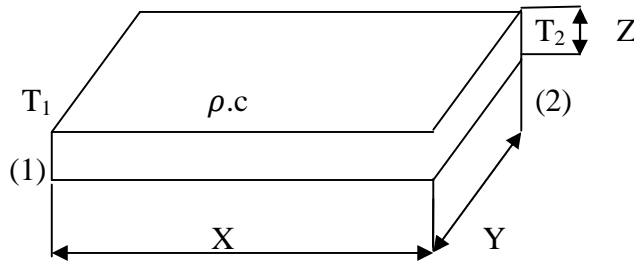
$\overrightarrow{\text{grad}T}$ (K . m⁻¹) : produit scalaire du gradient de température par le vecteur normal à ds.

La puissance d'échange thermique selon X devient :

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\lambda \cdot S}{X} (T_1 - T_2) \quad (\text{II-2})$$

pour $T_1 > T_2$, la chaleur s'écoule de la surface (1) vers la surface (2). le rapport

$\frac{x}{\lambda \cdot S}$ Représente la résistance thermique ($K \cdot W^{-1}$) du matériau et S l'aire de la surface d'échange (YZ).



ρ : masse volumique ;

C : capacité thermique massique ;

Fig.II.1 : bloc parallélépipédique (écoulement mono dimensionnel) [7]

II-2-2 La conductivité thermique :

La conductivité thermique λ est une propriété physico-chimique de la matière que l'on appelle aussi le coefficient de conduction thermique [3].

Dans de nombreux cas pratique, 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.

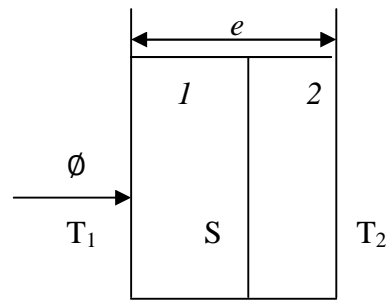
La conductivité est généralement exprimée par un tenseur à trois composantes. C'est le cas des matériaux anisotrope comme les empilages des tôles [7].

II-2-3 Conductivité thermique des solides hétérogènes :

Pour déterminer la conductivité thermique des solides hétérogènes, on utilise la notion de la conduction à travers un matériau de conductivité λ , d'épaisseur (e) et de section (s) dans la direction de la conduction et dans les faces externes sont respectivement aux température

T_1 et T_2 .

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



La quantité de chaleur transmise par conduction entre les deux surfaces est donnée par la loi fourier suivante :

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

avec : Φ : flux d'énergie transmise

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

e : distance entre deux surfaces dont la températures est T_1 et T_2 [m]

λ : conductivité thermique [$\text{w}/\text{m}^\circ\text{c}$]

D'où :

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

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

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

Remarque :

On peut généraliser cette notion au cas de milieu de formes différentes, alors on peut écrire.

$$R = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{e}{S_{\text{moy}}} \quad (\text{II-6})$$

➤ **Cas d'un cylindre**

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

S_{moy} : est la moyenne logarithmique des surfaces (1) et (2) interne et externe de cylindre

➤ **Cas d'une sphère**

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

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

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

II-2-3-1 Association parallèle :

Lorsque le flux de chaleur circule parallèlement aux différentes couches (i) la conductivité est déduite de la relation suivante

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

S_{moy} : dans le cas des géométries différentes. S est remplacé par S_{moy}

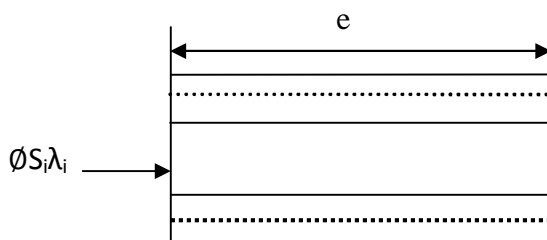


Fig II-2 : Association parallèle

II-2-3-2 Association série :

La conduction équivalente se duit de la relation suivante : $\lambda_{eq} S_{moy}$

$$\frac{1}{\lambda_{eq}} \cdot \frac{e}{S_{moy}} = \sum_i \frac{e_i}{\lambda_i (S_i)_{moy}} \quad (\text{II-10})$$

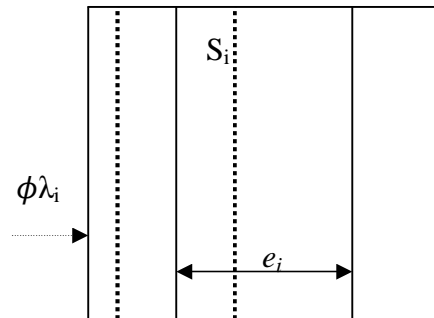


Fig. II-3 : Association série

II-3- Transfert de chaleur par convection :

Ce mode de transfert est spécifique en fluide, en plus de transfert par conduction il ya dans les fluides un transfert de chaleur par l'écoulement de fluide [6].

Cela se fait par l'intermédiaire d'un fluide en mouvement au contact des solides échauffés ou refroidies. Ces transferts sont caractérisés par des coefficients d'échanges h ou transmissibilités, la loi de newton permet de relier la densité de flux de chaleur à la différence de températures entre les deux milieux ; on a :

$$\varphi = h \cdot (T_f - T_s) \quad (\text{II-13})$$

Avec :

h : coefficient d'change entre le solide et le fluide en $W / m^2 \cdot ^\circ C$.

T_s : température de solide [$^\circ C$].

T_f : température de fluide [$^\circ C$].

La convection peut se diviser en deux modes :

II-3-1 Convection naturelle et convection forcée :

Selon la nature de mécanisme qui provoque le mouvement de fluide on distingue :

La convection libre ou naturelle : le fluide est mis en mouvement sous le seul effet des différences de masse volumique résultant des différences de températures sur les frontières et de champ de force extérieur (la pesanteur) .

La convection forcée : le mouvement de fluide est induit par une cause indépendante de différence de température (pompe ; ventilateur ...etc.). L'étude du transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre un fluide et une paroi.[10].

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

Notons que le coefficient d'échange h peut dépendre de plusieurs paramètres :

La géométrie, les propriétés de fluide (conductivité ; chaleur spécifique viscosité) la température la vitesse de fluide etc. [10].

II-4 Transfert de chaleur par rayonnement [4,7] :

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

Seul dans le cas où le fluide présent entre la surface d'échange est totalement transparent, (air) a été retenu. Les surfaces à considérer sont celles supposées noir, grises ou isothermes.

Les flux rayonnants sont bien souvent négligés dans les modélisations thermiques. Cela peut être relativement admissible dans les machines de puissances supérieures à 4- 5 KW en raison de basses températures de surface de (60 à 70°C).

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

$$\frac{dQ}{dT} = \varepsilon_{12} \cdot \sigma S (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{II-14})$$

ε_{12} : est un nombre sans dimension appelé le facteur de forme, il fait intervenir la géométrie considérée ainsi que les émissivités des deux corps.

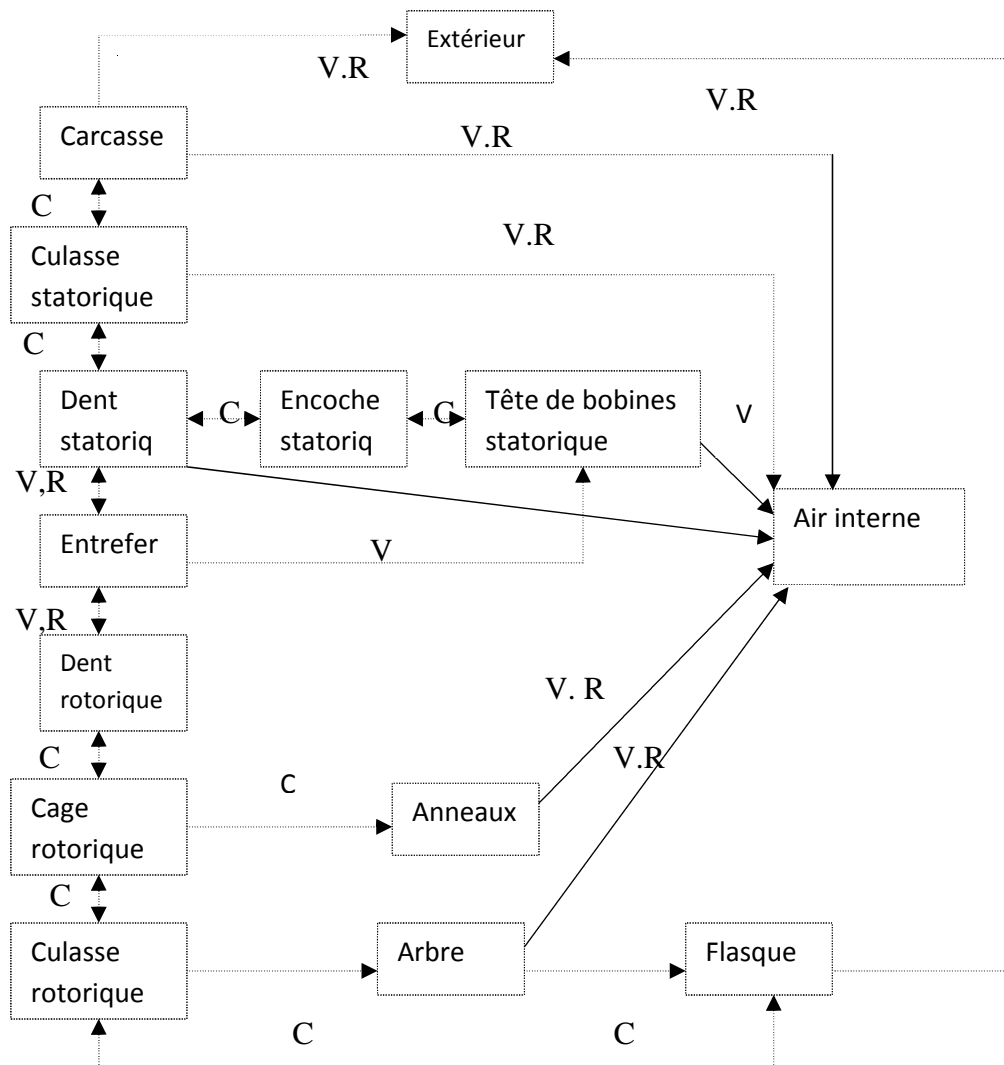
σ : est la constante de Stephan-Boltzmann.

II-5 Echange thermique dans une machine électrique :

Une machine électrique présente une très forte hétérogénéité thermique conséquence des propriétés de différents matériaux (divers isolants et conducteurs, présence de l'air etc...) qui la constitue [1].

La fig. II-4 montre les trois modes de transfert de chaleur habituels dans une machine électrique : la conduction, la convection et le rayonnement, mais à des proportions différents selon le cas. Vu que la majorité des sources de chaleur se trouvent au sein des matériaux, la conduction prédomine malgré l'existence de certains matériaux mauvais conducteurs de chaleur.

La convection se rencontre surtout sur les extrémités, dans l'entre-fer et l'extérieure de la machine. Enfin le rayonnement est présent dans toute la partie du moteur. Mais, on tient à faire remarquer qu'en raison des températures relativement basses, la contribution d'échange radiatif est très mineur [1,6].



C : conduction ; V : convection ; R : rayonnement

Fig II-4 carte générale d'échange thermique d'un moteur asynchrone à cage[4].

II-6 Méthodes d'étude thermiques:

Le domaine d'étude thermique des actionneurs électromécaniques s'appuie sur deux axes principaux :

Le premier est basé sur des maquettes pour déterminer la distribution de la température dans les machines électrique expérimentalement.

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

- La méthode nodale ;
- Les méthodes numériques ;

II-6-1 Méthode expérimentales :

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

Plusieurs approches qui en adopter cette méthode utilisent les différents appareils et capteurs de mesure selon l'utilité et les conditions de fonctionnement. Parmi ces méthodes on cite :

II-6-1 Méthode calorimétrique [9] :

Cette méthode permet de déterminer les pertes d'une machine électrique. Elle consiste en une infrastructure lourde car il faut mettre cette machine dans une enceinte isolée et mesurer l'énergie calorifique fournis par le système de refroidissement. le schéma d'une telle réalisation est présenter sur la Fig-II-5.

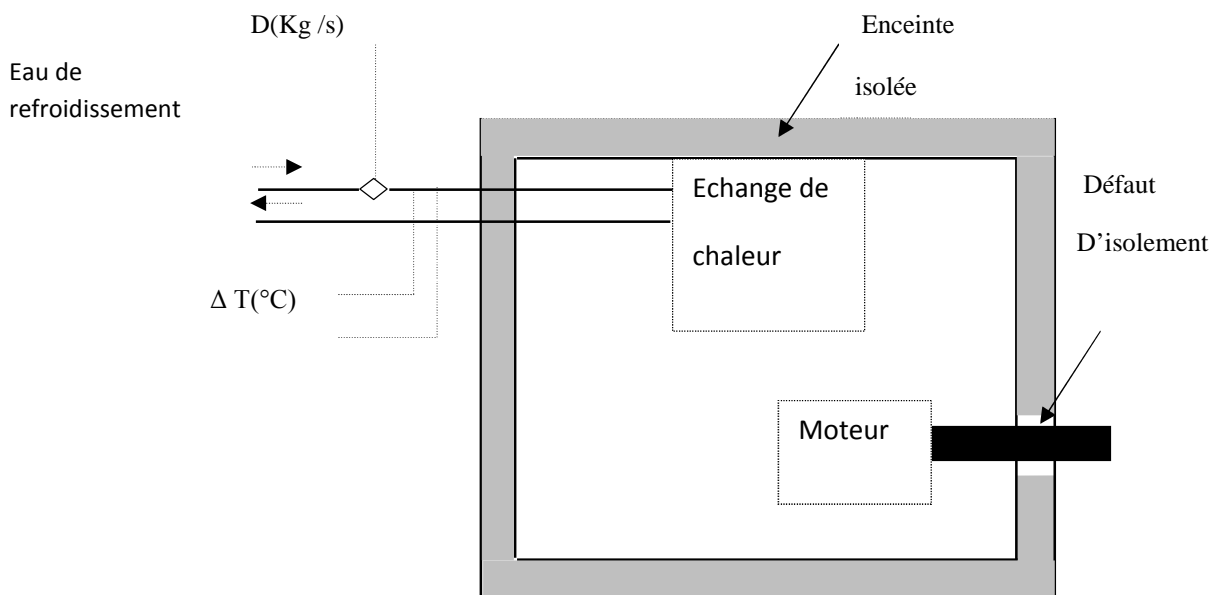


Fig-2-5 dispositif de mesure calorimétrique

Cette méthode est très lente, requiert l'utilisation de moyens de mesure très précis. Les difficultés liées à l'utilisation de cette méthode calorimétrique sont de trois types :

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

II-6-2 Mesure de température par des capteurs [7] :

Ces mesures consistent à placer des capteurs de température en différents endroits de la machine. Les capteurs les plus utilisés étant les thermocouples et les thermistances.

L'utilisation d'une telle démarche expérimentale présente des difficultés liées au problème de mise en place des capteurs particulièrement dans la partie interne de la machine (entrefer, barrotorique).

II-6-3 Par caméra infrarouge :

La caméra thermique est l'un des équipements nécessaires à la thermographie infrarouge. Celle-ci consiste à détecter des tendances thermiques ou variations de température dans les objets sans contact. Ce type de mesure sans contact permet d'éliminer l'influence du capteur.

Toutefois, elle reste réservée pour le seul cas où la surface est totalement observable [9].

II-6-2 Méthode théorique :

II-6-2-1 Méthode nodale:

La méthode nodale est une méthode largement utilisée dans ce type de travail. Son principe consiste à ramener l'étude du comportement thermique à un schéma équivalent en utilisant les notions de résistance et de capacités thermiques. Les pertes constituent alors le courant électrique est représenté par un flux thermique. Les potentiels en différents nœuds donnent les températures.

Nous rappelons sur le tableau (II-1) l'analogie thermoélectrique [9,6].

Grandeur thermique	Grandeur électrique
Puissance calorifique	Courant électrique
Température	Tension
Conductance thermique	Conductance électrique
Capacité thermique	Capacité électrique

Tableau-II-1 : analogie thermoélectrique

L'utilisation de ces méthodes impose la définition d'un paramètre commun dans les régions solides et fluides. La description des grandes étapes de la réalisation de cette modélisation est la suivante.

Découpage de la machine en blocs élémentaires (bobinage statorique, fer statorique et fer rotorique). Une autre approximation, plus performante divise la machine en cinq parties comme présenté par la (fig-II-6), chaque élément étant identifié par un nœud dans le réseau thermique avec sa capacité thermique et la source de chaleur correspondante.

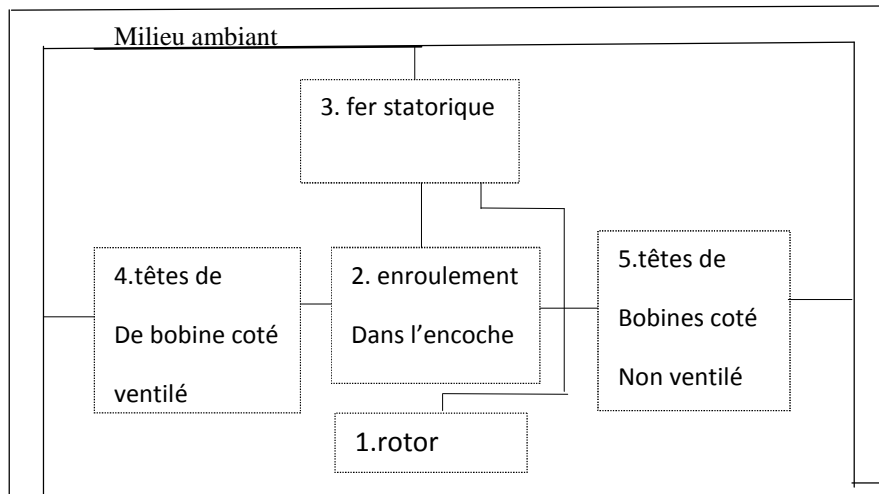


Fig-II-6. Découpage en 5 corps du moteur à induction.

En régime permanent, on détermine la température aux nœuds en résolvant le système suivant :

$$[G]\{\theta\}=\{p\} \quad (\text{II.15})$$

Où :

G : la matrice des conductances thermiques.

θ : le vecteur de températures inconnues.

p : le vecteur des sources de chaleur (pertes)

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

$$C_i \cdot \frac{d\theta_i}{dt} = \sum_{j=1}^n G_{ji} (\theta_j - \theta_i) + P_i \quad (\text{II} . 16)$$

Avec :

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

θ_i et θ_j : température des blocs i et j [°C].

G_{ji} : conductances thermique de connexion entre les blocs j et i [w/°C].

P_i : chaleur générée dans le bloc i [w].

$$C_i = \rho_i \cdot v_i \cdot c_i$$

ρ_i : la masse volumique (kg / m³)

V_i : volume élémentaire de nœud i (m³)

c_i : la capacité massique (j / kg. °c)

Les difficultés liées à cette méthode sont de trois ordres :

- La détermination des coefficients conductibilité et des capacités thermique dans les matériaux non homogènes ;
- La localisation de source de chaleurs nécessairement discrètes alors que les pertes sont distribuée ;
- La prise en compte de la ventilation ;

II-6-2-2 Méthodes numériques [9] :

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

II-6-2-2-1 Méthode des différences finies :

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

II-6-2-2-2 Méthode des éléments finis

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

II-7 Conclusion :

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

Nous avons aussi présenté les différentes méthodes d'étude thermique des machines électriques. En premier lieu, la détermination des températures et des pertes par des méthodes expérimentales, puis par la méthode théorique, nodale ou par éléments finis.

La modélisation thermique par ces trois méthodes présente encore des difficultés dues à la complexité de transfert de chaleur dans les machines électriques.

CHAPITRE III :
MOYENS DE MESURE DE
TEMPERATURE DANS
UNE MACHINE
ELECTRIQUE

III-1 Introduction :

La mesure de l'énergie thermique n'est pas accessible directement, on utilise pour mesurer la température l'effet de la chaleur sur certaine propriété physique, comme la dilatation des métaux ou des liquides, la résistance électrique, la tension thermoélectrique, la fréquence des oscillations d'un quartz, etc. [13].

La nécessité de prendre en considération tous les endroits des sources de la chaleur dans une machine électrique en plein fonctionnement, et le principe de mesure de la température avec des capteurs et des appareils sensibles, ainsi le mode de fonctionnement de ces dernières nous permet de distinguer trois méthodes de mesure de la température :

❖ Méthode de mesure de température par contact directe :

Ce sens en générale les capteurs actif qui se base sur le contact directe avec un point matériel sous l'effet thermoélectrique par mais eux :

- Les thermocouples
 - Les thermistances
 - Les sondes à résistance (on les trouve dans les systèmes de protection des machines électriques).
- ❖ Méthode de mesure de température sans contact :

Basée sur la relation entre la température d'un corps et le rayonnement optique émis par ce corps.

❖ Méthode de mesure mixte :

C'est un moyen qui utilise dans plusieurs travaux de recherche ; il base sur les deux méthodes à la fois.

III-2 Méthode de mesure de température par contact direct :

Cette méthode est utilisée beaucoup plus dans les parties fixes des machines électriques pour relever la température avec des capteurs qui transmettent l'information de la température par un contacte directe, entre l'élément sensible et le capteur.

Les capteurs les plus utilisés étant les thermocouples et les thermistances.

III-2-1 les thermocouples :

III-2-1-1 constitution et principe :

Le thermocouple est un capteur de mesure de la température sur la base de l'effet thermoélectrique, constituée d'un circuit formée de deux conducteurs A et B de nature différente réunis à l'une de leur extrémité par une soudure qui sera exposée à la température appelée la jonction de mesure T_2 (fig.III.1). Les deux autres extrémités reliées à un appareil de

mesure de température appeler la jonction de référence ($T_1 = T_{ref}$). Lorsque les deux extrémités sont soumises à des températures différentes, une différence de potentiel apparait entre les conducteurs $E_{A/B}^{T_1 T_2}$. la température est donc mesurable connaissons la température de référence [15].

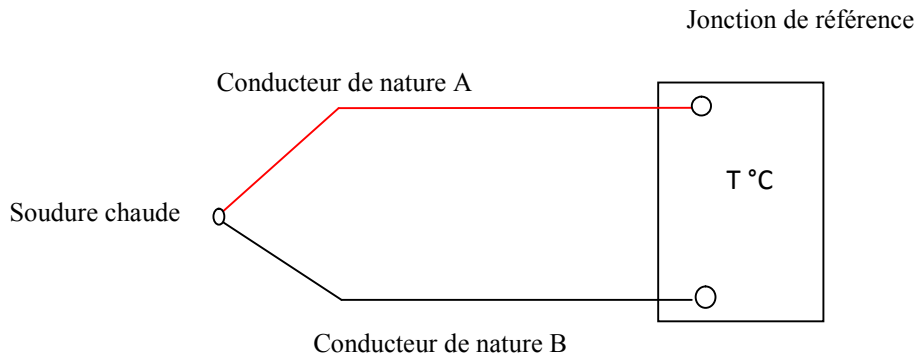


Fig.III.1 principe d'une réalisation d'un thermocouple

III-2-1-2 la température de référence d'un thermocouple [15]:

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

$$T_{ref} = 0^\circ\text{C}$$

T_{ref} est constante mais différente de 0°C

T_{ref} est variable, généralement égale à la température ambiante.

a-Température de référence est de 0°C :

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

b- Température de référence est constante mais différente de 0°C :

Lorsquela température ambiante risque de dépasser les limites de la plage de fonctionnement. La température de référence peut alors être obtenue à l'intérieur d'une enceinte chauffée dont la température interne qui sert de référence, est maintenue constante par régulation, à une valeur supérieure à l'ambiant. La connaissance de T_{ref} permet, à l'aide de la table du thermocouple de calculer :

$E_{A/B}^{T_{ref} 0^{\circ}C}$, la mesure de la f.é.m du thermocouple fournit une valeur correspondant à :

$E_{A/B}^{T_c T_{ref}}$; on en déduit la f.é.m dont le thermocouple serait le siège si la température de référence était de $0^{\circ}C$:

$$E_{A/B}^{T_c 0^{\circ}C} = E_{A/B}^{T_c T_{ref}} + E_{A/B}^{T_{ref} 0^{\circ}C} \quad (III.1)$$

c- Température de référence égale à l'ambient :

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

$$E_{A/B}^{T_c 0^{\circ}C} = E_{A/B}^{T_c T_a} + E_{A/B}^{T_a 0^{\circ}C} \quad (III.2)$$

Cependant, il existe des circuits, dits de correction de soudure froide, qui délivrent automatiquement une tension $V(T_a)$ égale à $E_{A/B}^{T_a 0^{\circ}C}$; celle-ci, ajoutée à la f.é.m du

thermocouple $E_{A/B}^{T_c T_a}$, permet d'avoir aux bornes du circuit de mesure la f.é.m $E_{A/B}^{T_c 0^{\circ}C}$.

III-2-1-2 Caractéristique :

C'est un capteur de température mécaniquement solide. Son étendue de mesure large, les températures maximales étant de 1000 à $1500^{\circ}C$, on l'utilise donc pour des mesures de hautes températures [8]. Parmi les matériaux pour les thermocouples, les plus représentatifs sont :

- Platine rhodium-platine (PR) : une faible f.e.m mais une grande précision, utilisable jusqu'à $1400^{\circ}C$
- Chromère-alumère (CA) : à partir de chromère (Ni 89%, Cr 9.8%) et d'Alumère (Ni 94%, Al 2%, Mn 2.5%), ces composants sont bon marché, et largement utilisés.
- Cuivre-constantan (CC) : le Constantan (Cu 55%, Ni 45%) résiste aux atmosphères réductrices, c'est un matériau prometteur.

Le tableau (annexe b) indique les principaux types de thermocouple et leur limite. Lorsque les conditions d'utilisation sont mauvaises, et les températures élevées, on utilise une gaine de protection en acier inoxydable de 0.25 à 12 mm de diamètre, qu'on remplit de magnésium (Mgo) et d'alumine (AL_2O_3), pour la solidité. Comme le diamètre extérieur est étroit, on peut la plier ou la fixer à l'objet de mesure.

III-2-1-3 Critères de sélection du thermocouple :

Le choix de type de thermocouple dépend en premier lieu de la température d'utilisation de plus il faut choisir un couple avec tension thermoélectrique élevée pour obtenir un signal de mesure aussi insensible aux parasites que possible. [11]

Les capteurs les plus utilisées pour la mesure de température dans les machines électriques et sauvant de type K. le couple de NiCr-NiAl montre une résistance à l'oxydation supérieur à celle des couples "E" et "J" ces pourquoi on l'utilise pour les mesures de températures au-delà de 500°C[12].

III-2-1-4 Avantage et inconvénient des thermocouples :

a- Avantage :

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

b- Inconvénients :

- Température de référence doit être connue.
- La non-linéarité.
- La nécessité d'une correction automatique ou manuelle due à la température de la source froide.
- Faible amplitude de signal.

III-2-2 Les thermistances :

III-2-2-1 Constitution et principe :

La thermistance est un élément semi-conducteur thermosensible dont la résistance électrique varie considérablement quand la température varie.

La plupart des thermistances utilisées sont des céramiques, et on peut les classer suivant leur caractéristique de base : si, au fur et à mesure que la température s'élève, la résistance électrique diminue de façon exponentielle [13].

La linéarité des thermistances est loin d'être réalisée [8], ce type de composante est souvent utilisé dans des appareillages de contrôle ou de commande, dans lesquels on détecte un seuil.

En associant plusieurs thermistances et résistance dans un même boîtier, on parvient néanmoins à réaliser des composants linéaires sur une plage relativement étroite de température.

Selon que le coefficient de température des thermistances est positif ou négatif, donc la courbe de la résistance fonction de la température est montante ou descendant, on parlera de thermistance CTP (coefficient de température positif) ou CTN (coefficient de température négatif) [15]. La troisième sorte possède la même caractéristique que la thermistance CTN mais sa résistance électrique baisse brusquement à partir d'un certain seuil de température : c'est la thermistance RTC (résistance à température critique).

a-Thermistance CTN :

les thermistance CTN ont comme composants principaux le NiO, MnO, Fe₂O₃, et on une constitution cristalline proche de la constitution spinale, en générale, les valeurs de ces résistance sont peu influencées par l'oxygène, et donc sont stables à l'air libre ; elles sont également peu perturbées par des impuretés. La résistance d'une thermistance peut s'écrire sous la forme approchée suivant :

$$R(T) = R_0 \exp B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (\text{III.1})$$

Où R_0 est la résistance à la température absolue T_0 , et B est une constante caractéristique de la thermistance considérée. A l'heure actuelle, B se situe entre 2000 et 5000 K et le domaine de mesure des thermistances peut atteindre 300°C. les thermistances à haute température sont composées de ZrO₂, Y₂O₃. Elles permettent des détections de température jusqu'à 1000°C.

b- Thermistance CTP :

Les thermistances CTP sont basées autour du groupe cristallin BaTiO₃, dont on contrôle la valeur atomique en ajoutant des éléments de terres rares comme Y₂O₃, et qui devient ainsi un semi-conducteur. La valeur de résistance croît brusquement avec une augmentation de température.

La température pour laquelle les valeurs de résistance varient brusquement est proche de point du Curie du cristal BaTiO₃. Les thermistances CTP étant les seules à posséder une telle caractéristique.

III-2-2-2 Avantages et inconvénient des thermistances [14] :**A - Avantages :**

- dimension réduites permettant des mesures ponctuelles de la température ;
- sensibilité thermique importante ;
- capacité calorifique réduite d'où des vitesses de réponses élevées ;

b-Inconvénient :

- nécessité d'une alimentation et le passage de courant risque de provoquer par effet joule un échauffement du capteur ;
- non linéarité imposant un étalonnage en plusieurs points ;
- la plage de mesure de température est réduite ;

III-2-3 Comparaisons entre les thermocouples et les thermistances [7] :

Des études comparant les avantages et les inconvénients de ces deux capteurs guident l'utilisation dans le choix des thermocouples ou des thermistances. Sur le tableau (III.2), une comparaison des principales caractéristiques de ces capteurs est donnée :

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.2 comparaison des principales caractéristiques des thermistances et des thermocouples

III-3 Méthode de mesure de température sans contact :

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

III-3-1 Pyrométrie optique :

La pyrométrie optique est une méthode de mesure de la température basée sur la relation entre la température d'un corps et le rayonnement optique (infrarouge ou visible) que ce corps émet.

Les capteurs utilisés sont donc des capteurs optiques, photoélectriques ou thermiques.

L'intérêt de la pyrométrie optique est de permettre la détermination d'une température sans contact avec l'objet, c'est donc une méthode appropriée quand les conditions expérimentales n'autorisent pas l'utilisation de capteurs thermométrique classique [15].

III-3-1-1 Principe physique :

Tout corps émet spontanément et en permanence un rayonnement électromagnétique dont le spectre continu a une répartition énergétique fonction de la température : c'est le rayonnement thermique. Ce rayonnement a pour origine des transitions radiatives provoquées dans les atomes et les molécules par l'agitation thermique. Les lois de cette émission sont d'abord établies pour un corps idéal, le corps noir, caractérisé par une absorption totale de tout rayonnement incident ; le rayonnement thermique d'un corps réel, selon son pouvoir absorbant, se rapproche plus ou moins de celui du corps noir [15].

III-3-2 Camera thermique [9] :

La caméra thermique c'est l'équivalent d'une pyrométrie à infrarouge. Elle permet de détecter des tendances thermiques ou variation de température dans les objets sans aucun contact.

La longueur d'onde ou (couleur) du rayonnement qui traduisant les variations de la température. la longueur d'onde est de l'ordre de plusieurs micromètre pour les températures autour de 20-30°C.

Cette caméra thermique peut être utilisée dans plusieurs secteurs d'activités, industrielles ou scientifiques etc...



Fig-III-2 caméra thermique

III-3-3- Avantages et inconvénients de la caméra thermique :**a-Avantage :**

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

b-Inconvénients :

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

III-4 mesure de la température sur des corps en mouvement [15] :

Lorsque la température à mesurer est celle d'une surface externe, la pyrométrie optique est la solution appropriée. Par contre, lorsque l'on veut connaître une température interne, un capteur doit être placé au point de mesure qui est mobile (cas de la partie tournante de la machine électrique) et la difficulté réside alors dans la transmission de l'information vers la chaîne de mesure qui est fixe ; différentes solution sont envisageable, à savoir :

- Le transformateur tournant : le primaire, inducteur, est fixé à la pièce en rotation et relié à un thermocouple ; le courant qui le parcourt dépend des températures de mesure des jonctions de mesure et de référence ; le secondaire qui est fixe constitue l'induit et il délivre à ses bornes une tension fonction de la f.é.m de seepeck du thermocouple alimentant le primaire mobile.
- Le couplage inductif passif : le circuit lié à la pièce mobile est constitué d'une bobine en série avec un capteur résistif, thermistance par exemple ; cette bobine passe périodiquement entre deux bobine réceptrice reliée à la chaîne de mesure (fig-III-3). Le passage de la bobine mobile entre les bobines fixes entraine une atténuation du signal reçu par la réceptrice, cette atténuation augmentant lorsque la résistance de la thermistance diminue à température croissante.

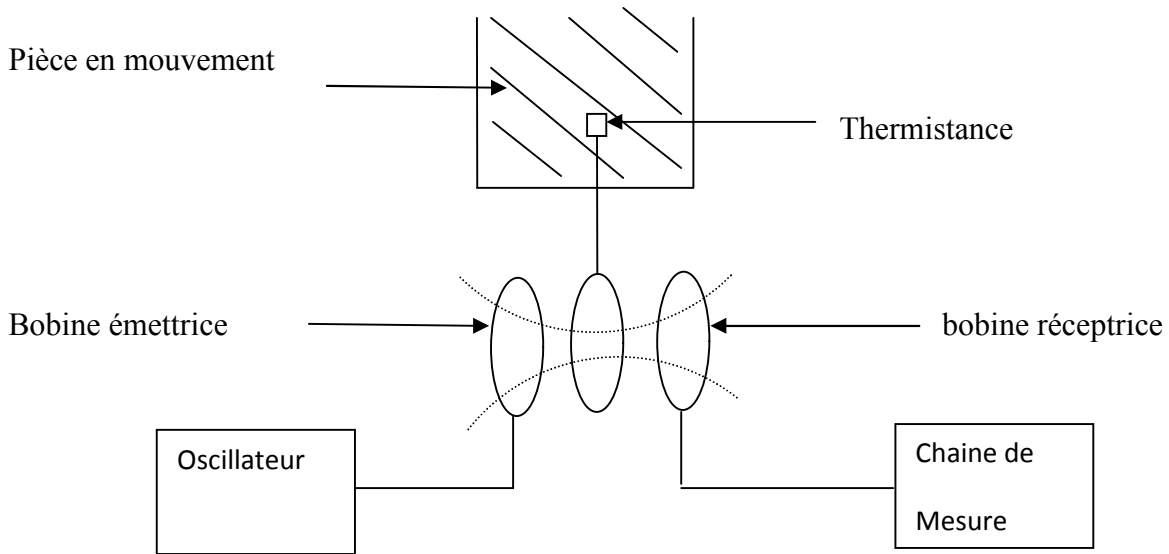


Fig-III-3 mesure de température d'une pièce en mouvement.

III-5 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents moyens utilisés pour l'étude thermique expérimentale dans les machines électriques. À savoir, selon les propriétés de la matière qui existe dans les machines électriques et le phénomène physique sensible à la température nous disposons de deux méthodes de mesure.

Par contact direct, nous utilisons des thermocouples qui se basent sur la variation thermique sous l'effet thermoélectrique, et des thermistances qui traduisent la variation thermique à une valeur d'une résistance.

Sans contact, avec des pyrométries optiques qui offrent la possibilité de mesure de la température dans quelques endroits de la machine électrique plus facilement que les autres capteurs.

On a présenté un exemple de mesure de température dans des pièces en mouvement, cas de la partie tournante de la machine électrique, le signal qui a été récupéré par le capteur thermocouple ou thermistance sert à l'exploiter une deuxième fois comme un transformateur.

Les deux premiers capteurs sont largement utilisés, notamment dans la partie fixe de la machine, cela est dû à leur possibilité de les utiliser dans des endroits étroits et à leur précision de mesure.

Le prochain chapitre sert à exploiter ces différents moyens de mesure pour une étude expérimentale d'une machine asynchrone à cage auto-ventilée de 2.2 kW.

CHAPITRE IV :
MESURE
EXPERIMENTALE DE LA
TEMPERATURE D'UNE
MACHINE
ASYNCHRONE

Chapitre IV: Mesure expérimentale de la température d'une machine asynchrone

IV-1 Introduction :

Nous avons présenté dans le chapitre précédant les différents moyens de mesure de la température dans une machine électrique,

Dans le présent chapitre nous cherchons à exploiter ces moyens pour mesurer expérimentalement l'évolution de la température dans le rotor et le stator d'une machine asynchrone à cage. Cette exploitation des différents moyens de mesure a l'objet d'avoir des résultats précis. Pour effectuer cette étude, on utilise deux méthodes expérimentales : par contact directe avec des thermocouples et sans contact avec la caméra thermique.

On commence par la présentation de la machine à étudier, puis on décrira brièvement le banc d'essai et ses différents éléments.

En second lieu on entame l'étalonnage des différents appareils de mesure de la température. Puis des essais préliminaires sur la machine à étudiée.

Ensuite nous présentons les différents résultats des essais d'échauffement effectués sur la machine et nous terminons par une corrélation.

IV-2 Présentation de la machine a étudié :

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

- Type 890-1064-0041
- Marque ENEL (électro-industrie) N°22-128-02
- Puissance 2.2 kw
- Tension nominale 380 v
- Courant nominal 5.2 A en triangle
- Vitesse de rotation 1410 trs/min
- Facteur de puissance $\cos \theta = 0.83$
- Classe d'isolation F (155°)

IV-3 Description du banc d'essai :

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

Une génératrice à courant continu pour l'essai en charge et l'essai de rotation. Elle possède les caractéristiques suivantes :

- De type DL 2062
- Puissance nominale 2.4 kW

Chapitre IV: Mesure expérimentale de la température d'une machine asynchrone

- Tension nominale 220V
- Courant nominale 10.9 A
- Courant d'excitation 1.6 A
- Vitesse nominale 1420 A

Deux pupitres d'alimentation avec deux sources alternatif une fixe (380 v/ 20A), l'autre variable et une source continu.

Différents appareils de mesure (ampèremètres, voltmètres, wattmètre, tachymètre, chronomètre, thermomètre).

Capteurs de température ; thermocouple type K.

Deux rhéostats.

Une charge résistive.

Des fils électriques de câblage.

IV-4 Description de l'enregistreur de température :

L'ECOPOINTEUR avec six voies de mesure enregistre toute variable physique préalablement traduite en signal électrique comme la température, la pression, le débit, la puissance, la vitesse etc. Les vois 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-5 L'emplacement des capteurs dans la machine asynchrone :

Le moteur étudié est équipé de sept (7) thermocouples de type k, permettant l'évaluation des températures de cinq point de la partie statorique et deux point de la partie rotorique de la machine (Fig IV.2). Il faut noter que l'emplacement des capteurs est dicté par trois critères essentiels, à savoir, l'accessibilité, la ventilation et la source de chaleur.

L'emplacement de ces thermocouples, est comme suit :

Th4 : anneaux de court-circuit sur le rotor coté non ventilé.

Th10 : anneaux de court-circuit sur le rotor coté ventilé.

Th5 : têtes de bobine cotée ventilé.

Th7 :têtes de bobine cotée non ventilé.

Th6: l'encoche statorique.

Th3: l'entrefer.

Th8: carcasse

Pour un excellent contact thermique des thermocouples, nous utilisons une colle spéciale qui résiste bien à la chaleur

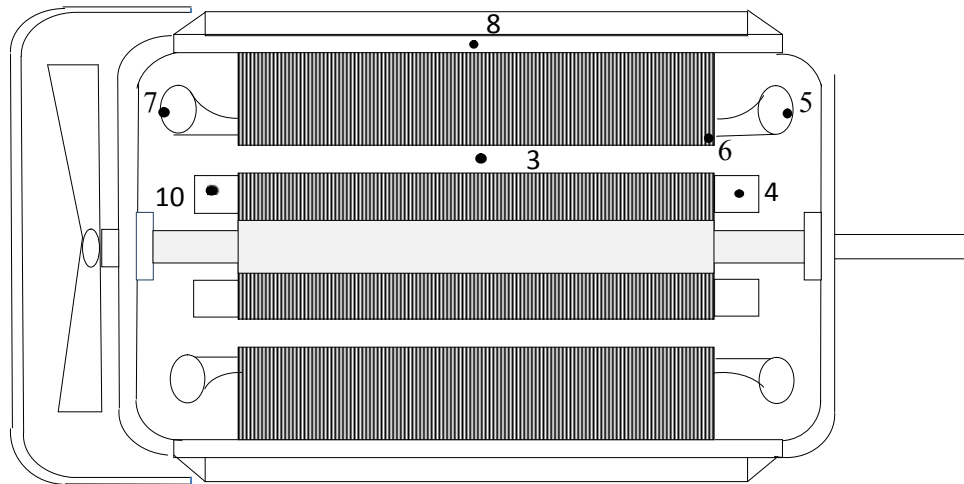


Fig IV.2 Emplacement des thermocouples

IV-6 Mesure Préliminaire :

Les mesures préliminaires permettent de s'assurer du bon fonctionnement des appareils et des indications des capteurs. Pour cela on commence par l'étalonnage des capteurs.

IV-6-1 Etalonnage des appareils de mesure de température :

Dans cet essai on utilise une enceinte isotherme (four) ou la température est connue, cette température sert de référence pour l'étalonnage des appareils de mesure et des capteurs.

IV-6-1-1 Présentation et principe de fonctionnement du four :

Le four utilisé est une enceinte isotherme dont la température est réglable et régulé à la température désirée à partir de l'ambient jusqu'à 250°.

Le four est alimenté avec une source de 380 V, il possède un commutateur de mise sous-alimentation avec deux positions : une pour le mettre sous-alimentation et l'autre pour couper l'alimentation, et deux boutons : un en vert pour la mise en marche et l'autre en rouge pour la mise en arrêt.

Un thermomètre numérique indique la température qui règne à l'intérieur du four en vert et la température souhaitée en rouge. Cette dernière peut être réglée avec deux touches à côté de l'afficheur : une vers le haut pour faire augmenter la température, l'autre vers le bas pour la diminuer.

IV-6-1-2 Principe de l'essai :

L'essai consiste à vérifier la réponse de différents appareils de mesure on utilisant le four comme une source de chaleur connue.

En place à l'intérieure du four un thermocouple relié à l'appareil de mesure (ECOPOINTEUR), et un thermomètre à mercure qui sert à la mesure de la température ambiante dans les essais prochains, plus une caméra thermique. On alimente l'appareil de mesure avec une tension nominale de 220V.

Puis, on fait varier la température du four, du la température ambiante jusqu'à 100°C et en fait le relevé du thermocouple, du thermomètre à mercure et du la caméra thermique pour chaque écart de 5°C du four. La valeur initiale des différents appareils est la température ambiante avant que le four ne soit mis en marche. La première valeur affiché par le thermomètre de four en marche avant l'augmentation de la température est la température ambiante de four elle est de l'ordre de 30°C. Le thermomètre à mercure est limité à 50°C.

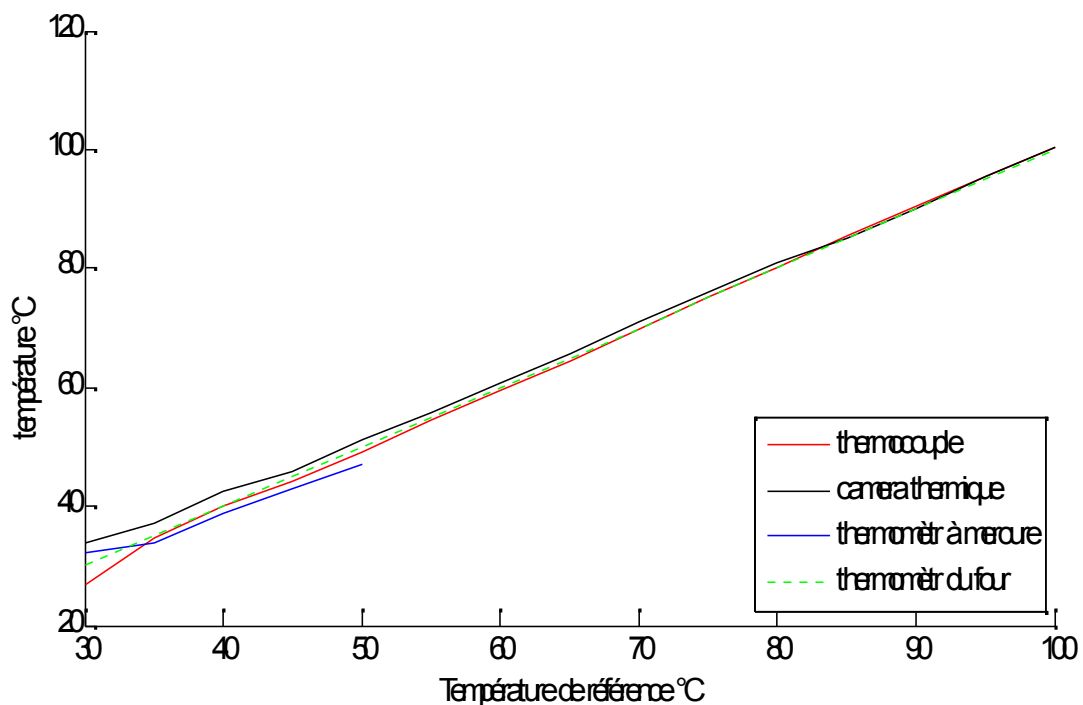


Fig .IV.1 caractéristique de l'échauffement du four mesurée par les appareils de mesure

IV-6-1-3 Observation :

En constate que le thermocouple suit la caractéristique de référence et sa réponse de mesure ne présente aucune erreur sauf dans la valeur initiale ou la température est de l'ordre de 27°C. Cette valeur c'est la température ambiante. Une erreur existe Lorceque la différence et

Chapitre IV: Mesure expérimentale de la température d'une machine asynchrone

nulle entre la soudure de mesure et la soudure de référence de thermocouple. Par contre, pondent l'échauffement du capteur cette erreur disparaît.

Pour la caméra thermique elle présente quelque degré de plus par rapport à la référence, sa mesure à l'ambient indique 34°, puis jusqu'à 80°C d'échauffement en remarque que la camera indique les mêmes mesures que la référence. De fait que la camera nécessite un certain temps d'échauffement de l'appareil, pour les valeurs indiquées soient stabilisées.

Le thermomètre à mercure a présentée au début une valeur de 32°C supérieure à celle du four qui est de 30°C puis pendant l'échauffement il devient en retard de 2°C. Comme c'est un appareil destiné à la mesure de la température ambiante, il présente des erreurs plus ou moins de 2°C.

IV-6-2 mesure de la température avec un thermocouple assemblée aux conducteurs de nature différente :

Pour se rapproche du système mécanique utilisé au rotor entre l'appareil de mesure et la tête de mesure du thermocouple, on a assemblés un thermocouple avec deux conducteurs de cuivre entre l'appareil de mesure et la soudure du thermocouple comme le présente le schéma suivant (Fig.IV.1).

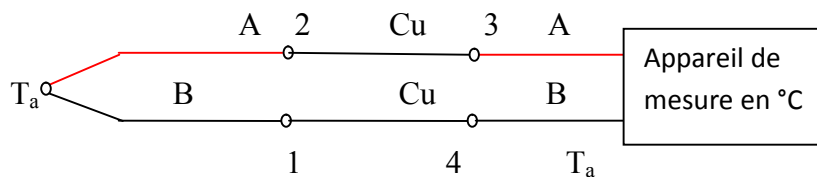


Fig.IV.1 schéma d'un thermocouple couplé aux conducteurs de nature différente

Au début le thermocouple mesure la température ambiante qui est de 29°C ainsi que tous les autres capteurs branchés directement à l'appareil de mesure. Par la suite nous avons imposé une température importante au point 1 et 2 au même temps avec un fer à souder. On remarque que la mesure diminue. Puis on a procédé de la même façon sur le point 3 et 4 et la mesure augmente contrairement du premier cas. Dans la troisième étape on a imposé cette température au milieu des conducteurs de cuivre, on a remarqué que l'appareil de mesure affiche toujours la même valeur.

De ce fait on a constaté que le thermocouple peut compenser la mesure de température à condition que le système de connexion soit à la même température ou bien les extrémités de connexion soient à la même température.

IV-6-3 Influence du système bagues balais sur la mesure de température

IV-6-3-1 A l'arrêt :

Comme on s'intéresse à la mesure d'échauffement rotorique de la machine, on a introduit un système mécanique constitué de quatre bagues en bronze sur un axe solidaire avec le rotor et de quatre charbons fixée sur la carcasse de la machine. Pour s'assurer que ce système mécanique n'a pas d'influence sur les mesure, on doit le contrôle avec une source de chaleur connue.

Le thermocouple est à l'intérieur du four et les conducteurs du capteur passent par le système bagues balais, vers l'appareil de mesure. Puis on fait varier la température de four du la température ambiante jusqu'à 100°C, on a remarqué que le thermocouple mesure la température de la même façon que le thermomètre de four. Le système mécanique n'a pas d'influence sur la mesure dans ces conditions. Mais quand le système est soumis à la rotation, celle-ci provoque des frottements qui chauffe les bagues et par conséquent change les conditions de contact. Toutes ces difficultés doivent être prise en compte par des tests présentés dans le paragraphe suivant.

IV-6-3-2 en rotation :

a-Avec un thermocouple :

a-1-Principe de l'essai :

Le thermocouple passe par le système bagues balais vers l'appareil de mesure, et la sonde chaude du thermocouple est placée sur l'arbre à l'extérieur de la machine est soumis à la température ambiante, la machine est entraînée par la génératrice à courant continu en fonctionnement moteur, à sa vitesse nominale.

a-2-Schéma de montage :

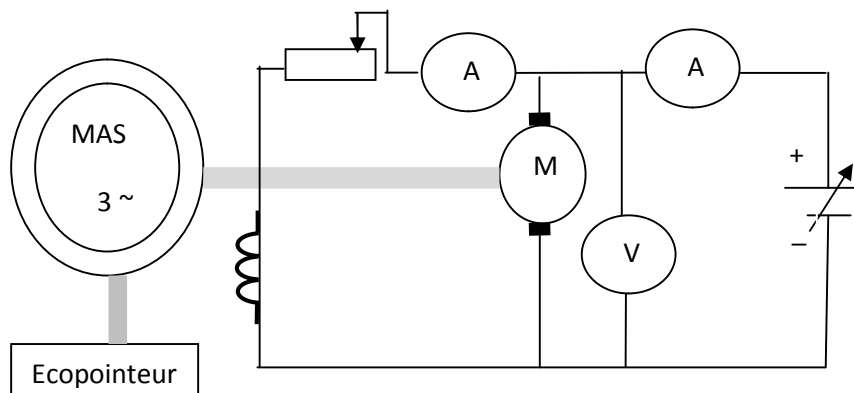


Fig.IV.3 Schéma de montage pour l'essai de rotation.

le capteur utilisé dans ce test est note (Th1)

le capteur (Th2) placer sur la dent.

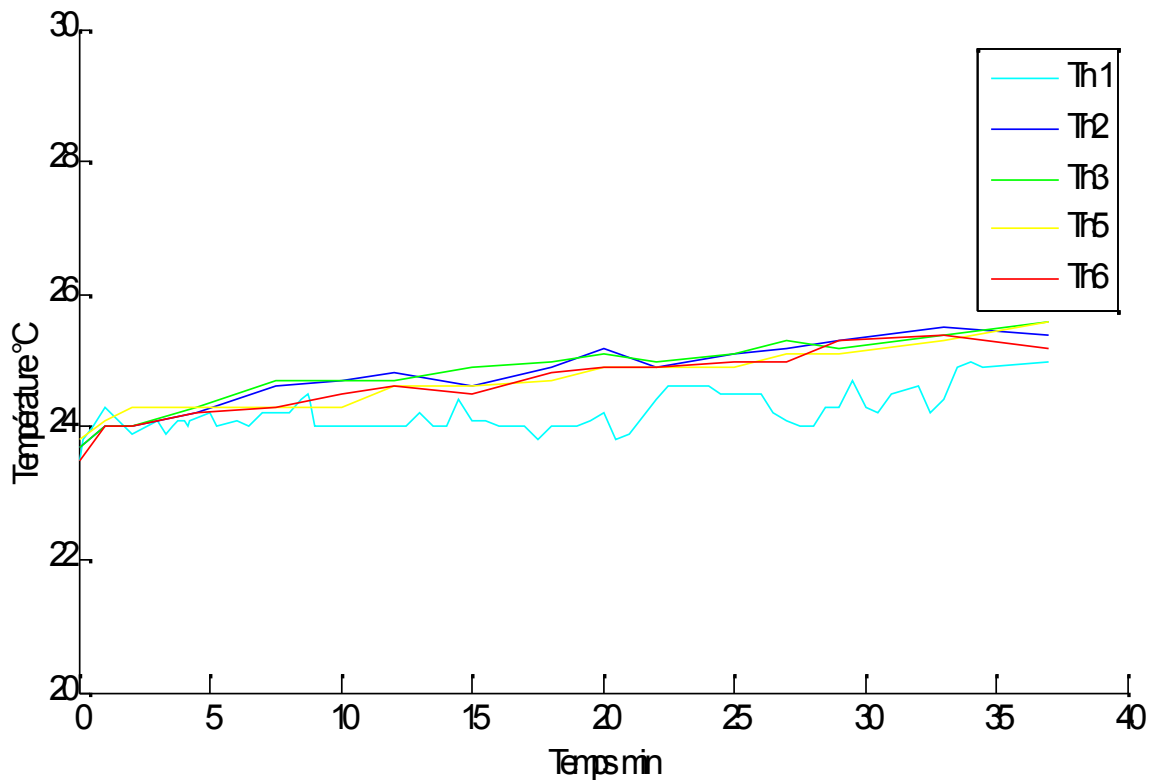


Fig.IV .2 caractéristique de la température ambiante avec un capteur en rotation

On remarque dans cette courbe après 10 minutes les mesures du capteur (Th1) présente un écart par rapport aux capteurs de la partie statique de 1°C à 2°C. Puis, cet écart reste constant jusqu'à l'arrêt. Cela est dû évidemment à la rotation.

b-Avec deux thermocouples à la fois :

Les deux capteurs sont placés sur les anneaux de court-circuit rotorique et sont testés individuellement et en même temps dans l'essai de rotation.

b-1 Principe de l'essai :

On procède de la même façon que l'essai précédant mais avec les deux capteurs (Th4) et (Th10) à la fois qui son placer à l'intérieure du rotor.

Chapitre IV: Mesure expérimentale de la température d'une machine asynchrone

Dans cet essai le capteur Th 3 mesure la température ambiante à l'air ambiant

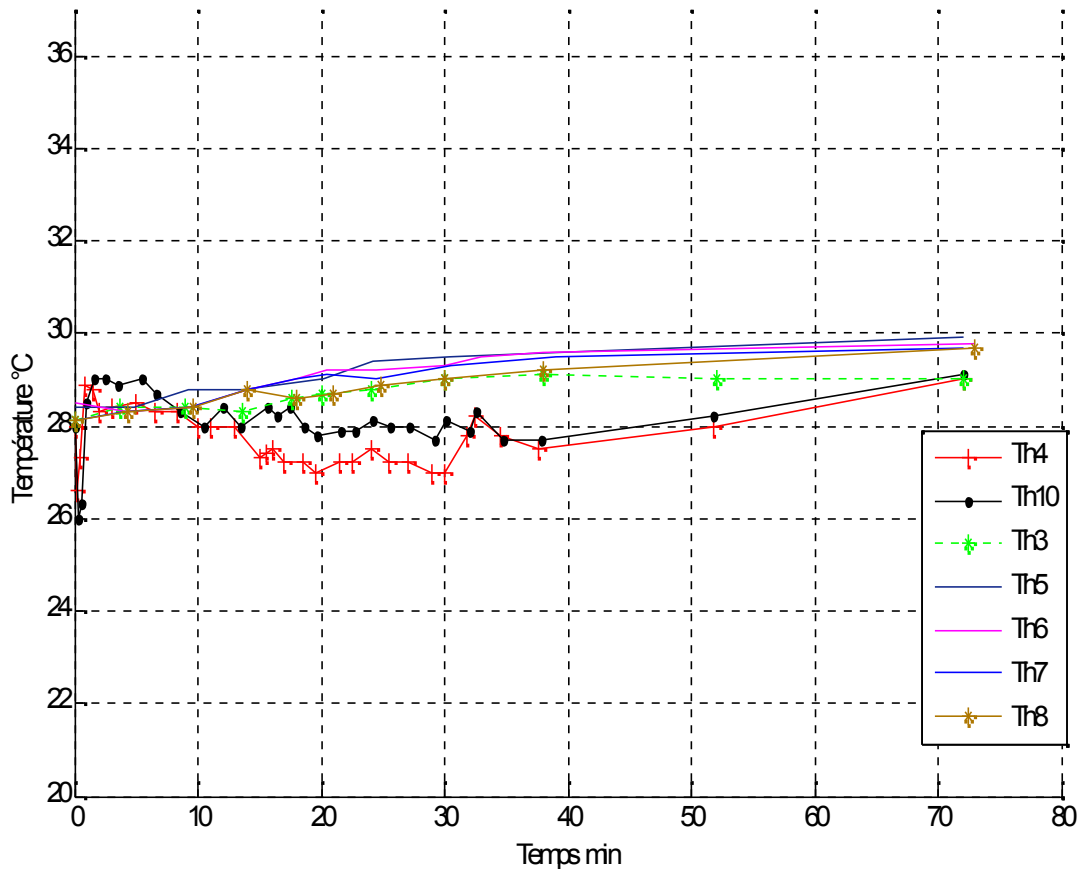


Fig.IV .3 caractéristique de la température ambiante avec deux capteurs en rotation

Cette courbe nous montre l'évolution de mesure de température des capteurs rotatifs similaire que l'essai précédent, mais avec un écart de mesure différent entre les deux capteurs par rapport aux autres capteurs de la partie statique. Le thermocouple (th4) présente un écart de mesure plus important que le thermocouple (Th10). Mais l'allure de la courbe est la même.

On constate, qu'au début de l'essai, la mesure des capteurs rotatifs chute brusquement de 28°C à 26°C au cours d'une minute puis rejoint leurs valeurs.

Après 10 minutes, l'écart est de 2°C à 3°C pour Th10 et Th4 respectivement, et ce maintient à ces valeurs jusqu'à l'arrêt de la machine on remarque que les indications des capteurs rotatifs augmentent brusquement jusqu'à 28°C puis chute à 27,5°C au cours d'une minute. Puis jusqu'à 70 minutes ils rejoignent les autres capteurs. Cette atténuation du début et l'augmentation de la fin de rotation ne peuvent être provoquées que par cette dernière.

Chapitre IV: Mesure expérimentale de la température d'une machine asynchrone

Puisque, cette erreur de mesure qui est dus à la rotation dépend elle aussi de plusieurs paramètres l'état de l'erreur de mesure, donc on est obligé de refaire cette essai de rotation avant chaque essai d'échauffement de la machine.

IV-6-4 Mesure préliminaire sur la machine :

La machine étudié est une machine destinée à l'outil industrielle, et afin qu'on puisse l'utilisé on a porté quelques modifications dans ces différent pièces. Il s'agit d'un trou percé sur l'axe de rotor pour la fixation de système bagues balais, et un trou sur la flasque cotée non ventilée pour les mesure de température par caméra thermique, au niveau du rotor et les têtes de bobine. La conséquence de ces modifications sur le transfert de chaleur fait l'objet du paragraphe suivant.

IV-6-4-1 Vérification de l'état de contact des capteurs au niveau des têtes de bobine :

Pour vérifier cet état de contact, on alimente une phase de la machine démontée. Les capteurs étant placé sur les têtes de bobine de cette phase et soumis à la température ambiante.

On alimente la phase U_1 ; U_2 ; qui porte les deux capteurs avec un courant équivalent ou courant nominal en étoile $I_n=3A$.

Nous remarquons que les deux capteurs indiquent la même valeur durant toute la période de l'échauffement, donc l'état de contact des capteurs est bien effectué.

IV-6-4-2 Incidence trou percé sur la flasque :

Deus essai à vide sont effectuée avec et sans trou, les résultats ont montrée aucune incidence sur les relevés.

IV-7 Différents essais expérimentaux effectués sur le moteur :

- Essai à rotor bloquée ;
- Essai à vide ;
- Essai en charge ;

Dans ces trois essais le rotor est relié à la masse. Les têtes des thermocouples doivent être isolé d'une façon qu'ils ne soient pas connecté à la masse, aussi pour éviter les perturbations duréseau sur l'appareil de mesure on utilise un deuxième pupitre pour l'alimenter.

IV-7-1 Essai à rotor bloquée :

L'objectif de cet essai est de voir l'état d'échauffement du moteur et d'observer l'influence des changements, effectuée dans la machine, sur les mesures.

Chapitre IV: Mesure expérimentale de la température d'une machine asynchrone

Pour cela deux essais sont effectués.

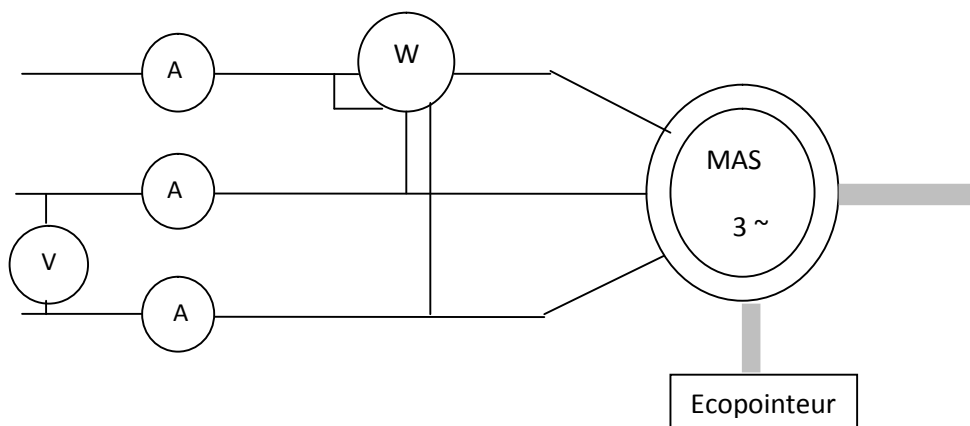
Le premier est un essai à rotor bloqué avec les capteurs rotorique liée directement à l'appareil de mesure. Le deuxième est un essai à rotor bloquée avec les capteurs rotorique passant par le système bagues balais. Le premier servant de référence au deuxième.

IV-7-1-1 les capteurs rotoriques reliés directement à l'appareil de mesure :

a-principe de l'essai :

On bloque le rotor du moteur avec un système mécanique de telle sorte qu'il ne tourne pas, puis on alimente le moteur avec son courant nominal on utilisant une source d'alimentation sinusoïdale variable.

b-schéma de montage :



FigIV.4. schéma de montage de l'essai à rotor bloquée

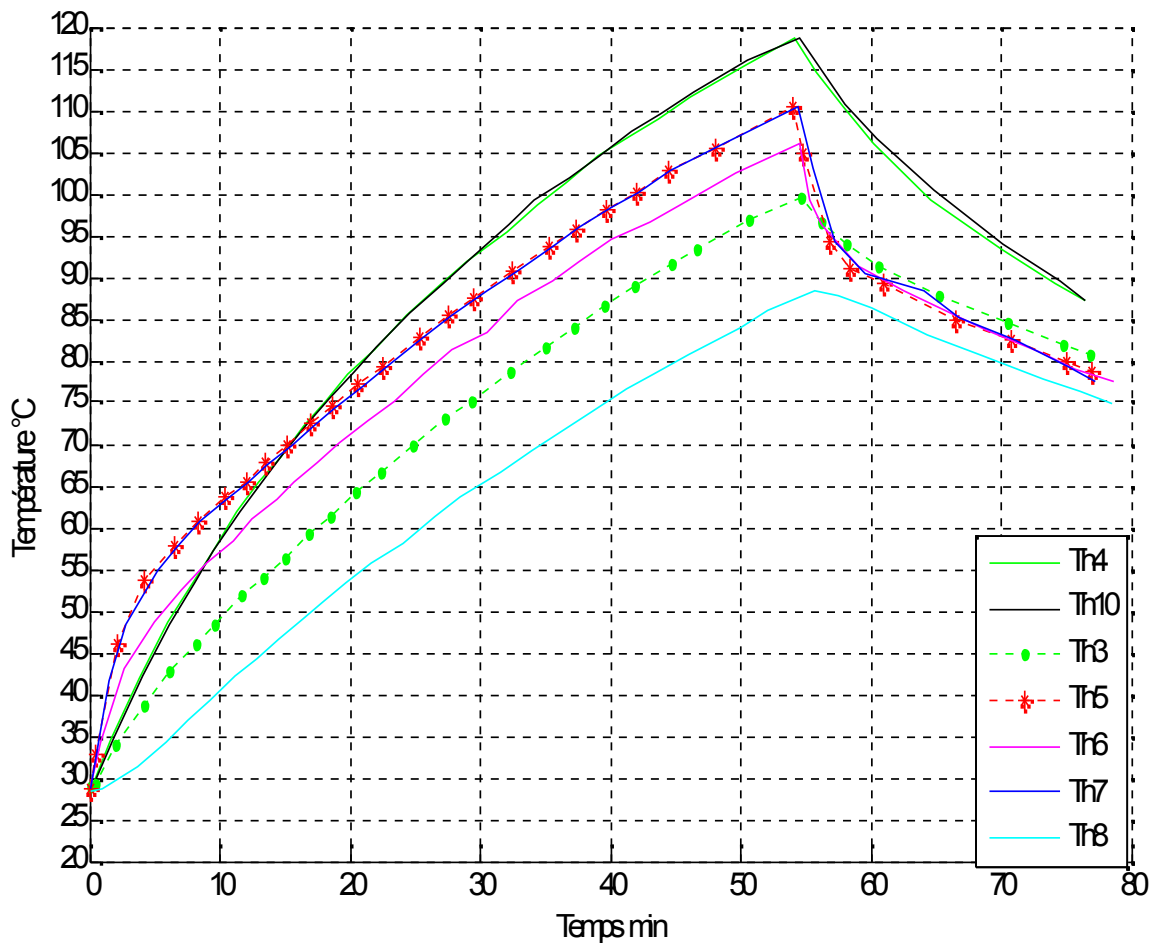


Fig.IV.4. Courbe d'échauffement et de refroidissement lors de l'essai à rotor bloqué sans bagues-balais.

c-observation :

Au début de l'essai la température ambiante est de 29°C, et elle est de 30°C à la fin de l'essai.

Les courbes d'échauffement des thermocouples Th7, Th5, Th10 et Th4 placés respectivement sur les têtes de bobine cotée ventilée et non ventilée, rotor coté ventilé et non ventilé ont pris une forme identique et de même valeurs.

De ce fait, ceci montre que les modifications portées sur le moteur n'ont pas d'influence sur les mesures.

Au début les têtes de bobine sont les plus chaudes. Après 10 minutes de temps l'échauffement rotorique commence à devenir le plus important que celui de l'encoche statorique.

Chapitre IV: Mesure expérimentale de la température d'une machine asynchrone

A 20 minutes, l'échauffement rotorique commence à dépasser celui des têtes de bobines qui sont les plus chaudes dans la partie statorique.

La plus grande valeur d'échauffement atteinte par les capteurs rotorique à 54 minutes est de 118°C. Celle de têtes des bobines est de 110°C avec un écart de 8°C. La moins chaude est celle de la carcasse qui atteint 88°C avec un écart de 22°C par rapport au rotor.

Les courbes statoriques atteignent le même point pour former la même courbe avant les capteurs rotoriques qui sont les plus lents.

A la fin de l'essai d'échauffement on lit les différentes valeurs sur les appareils de mesure qui sont présentés dans le tableau suivant :

Tension entre Phase (U)	Courant de ligne (I)			Puissance absorbée (W)
	L1	L2	L3	
67V	4.5A	4.6A	4.7A	360 W

Tableau. IV.1 différentes mesures de l'essai à rotor bloqué.

IV-7-1-2 les capteurs reliés à l'appareil de mesure à travers le système bagues balais :

a-Principe de l'essai :

On procède de la même manière que l'essai précédent avec le système bagues balais en plus pour la mesure de l'échauffement rotorique.

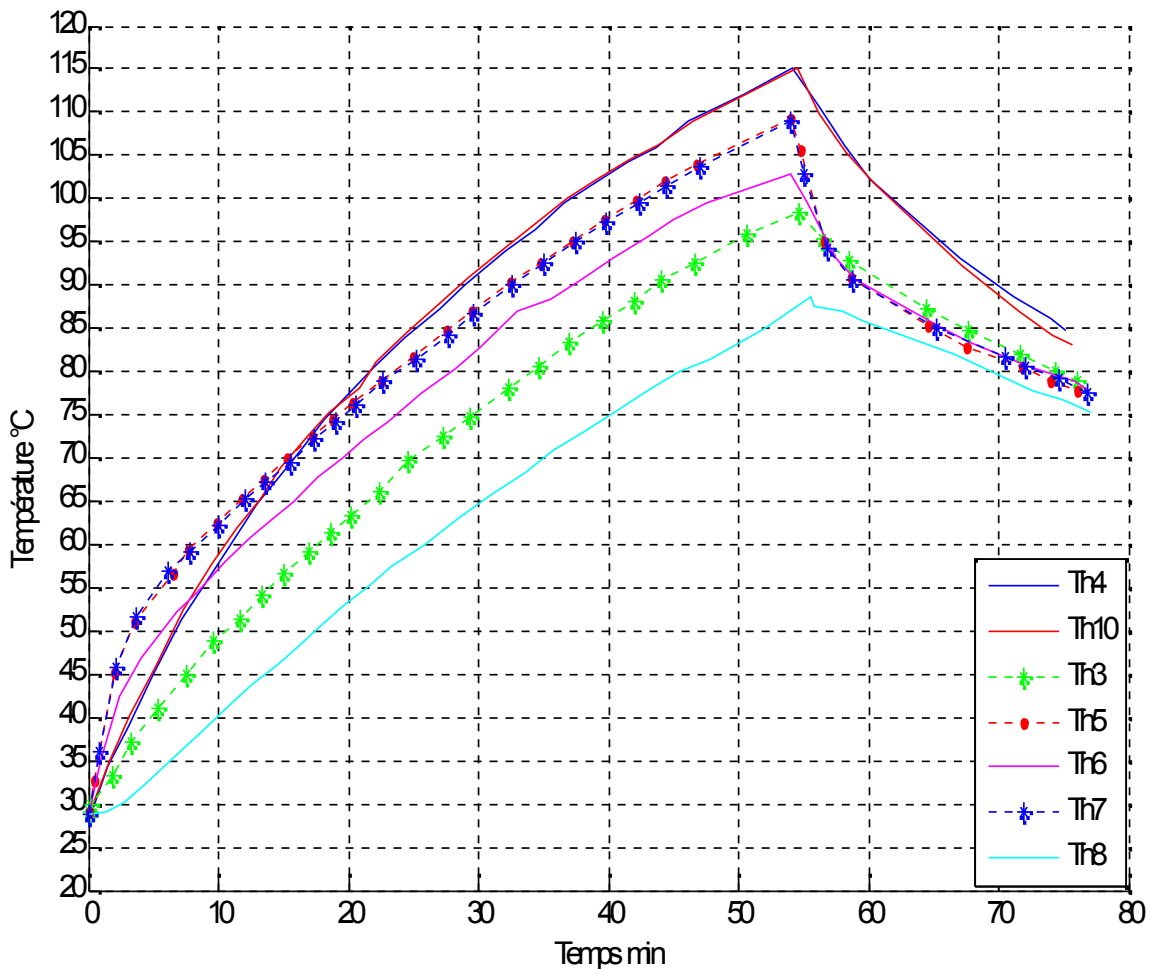


Fig. IV.5. Courbe d'échauffement et de refroidissement lors de l'essai à rotor bloqué

b-observation :

La courbe de l'échauffement avec le système bagues balais a pris la même forme que celle de l'essai précédent, la partie statorique est identique du début jusqu'à la fin pour les deux essais, la valeur maximale est de 109°C pour les deux têtes de bobines,

La partie rotorique au début présente la même que l'essai précédent, elle débasse les têtes de bobines à 20 minutes de temps d'échauffement. La valeur maximale au rotor est de l'ordre de 115°C avec un écart de 6°C comparé à la valeur maximale d'échauffement des têtes de bobines.

à partir de 90°C d'échauffement l'écart de mesure entre le premier et le dixième essai de la partie rotorique commence de 1°C jusqu'à 3°C à la fin de l'échauffement. Comme les courbes rotorique ont pris la même forme dans les deux essais donc cette erreur de mesure est due à l'échauffement des bagues à travers l'axe rotorique qui déséquilibre la compensation des capteurs au niveau des connexions de système bagues-balais.

Chapitre IV: Mesure expérimentale de la température d'une machine asynchrone

De ce fait dans les essais à vide et en charge on doit mettre les bagues et les balais au milieu du capteur utilisent des fils de cuivre de même longueur pour que le capteur puisse compenser l'erreur de mesure. De plus dans l'essai à vide la température de moteur ne dépasse pas les 60°C, et dans l'essai en court-circuit l'erreur commence à affecter la mesure à partir de 70°C. Dans ce cas on tiendrait compte que de l'erreur due à la rotation.

À la fin de l'essai d'échauffement on lit les différentes valeurs sur les appareils de mesure qui sont présentés dans le tableau suivant :

Tension entre Phase (U)	Courant de ligne (I)			Puissance absorbée (W)
	L1	L2	L3	
66V	4.7A	4.7A	4.6A	360 W

Tableau. IV.2 différentes mesures de l'essai à rotor bloquée.

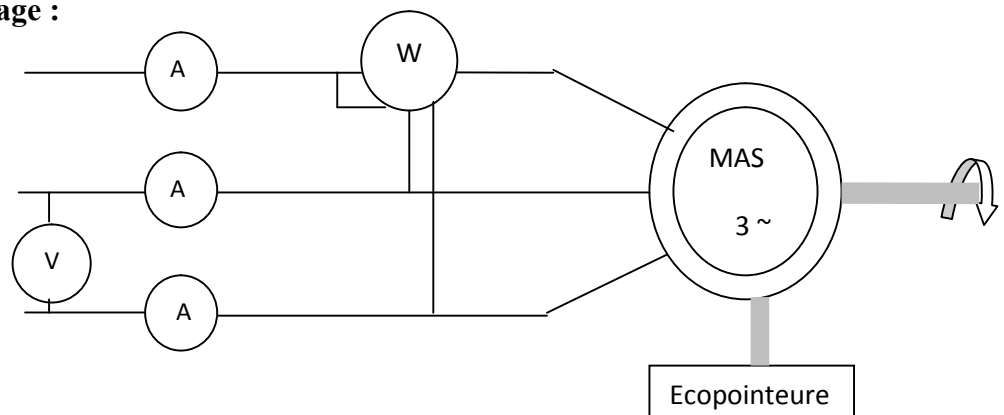
IV-7-2 Essai à vide :

a-principe de l'essai :

Au début de cet essai le moteur asynchrone est entraîné par la génératrice à courant continu en fonctionnement moteur à sa vitesse nominale jusqu'à ce que la mesure des capteurs rotorique se stabilise. Cela, afin de faire apparaître l'erreur qui dû à l'échauffement des bagues par frottement avec les balais

En suite on arrête la rotation et on même instant on alimente le moteur sous sa tension nominale. Le moteur est accouplé à la génératrice à courant continu sans excitation.

b-schéma de montage :



FigIV.5. schéma de montage de l'essai à vide.

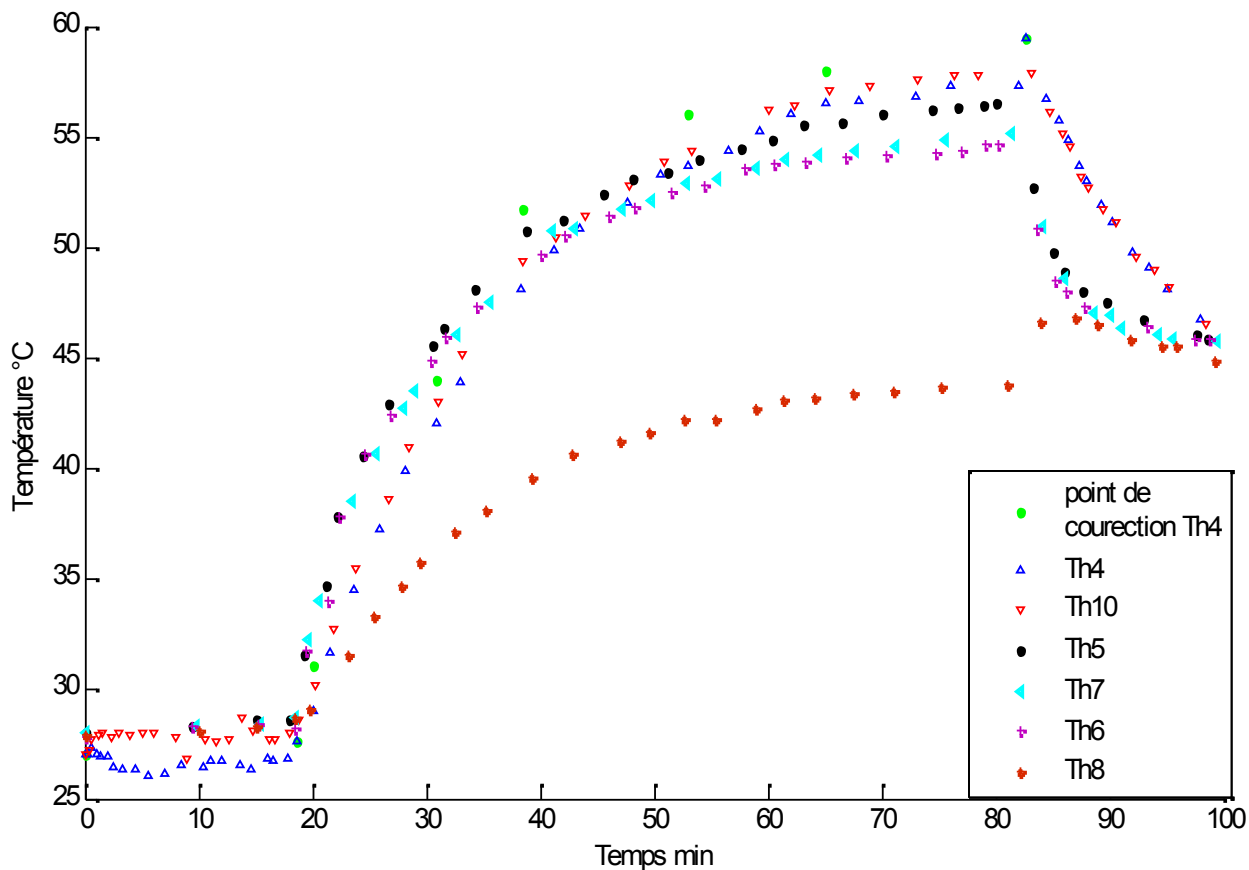


Fig.IV.6 Courbe de l'échauffement et de refroidissement lors de l'essai à vide.

c-correction des capteurs rotorique :

Les courbes des thermocouples rotorique pendant l'essai de rotation ne présentent pas une grande erreur de mesure par rapport aux autres capteurs de la partie statorique. Le capteur Th10 à présenter une erreur de mesure qui ne dépasse pas 0.5°C , par contre le capteur Th4 à présenter une erreur de 1.4°C par rapport à celles des autres capteurs de la partie statique.

Pendant l'essai d'échauffement la courbe d capteur Th4 inférieure à celle de Th10, puis juste à l'arrêt du moteur, la mesure du capteur Th4 augmente de 57.3°C à 59.5°C . Le capteur Th10 augmente de 57.8°C à 57.9°C . le capteur Th4 est moins compenser que le capteur Th10 qui est presque totalement compenser.

La mesure du capteur Th4 doit être corrigée de 2.5°C à partir de point au la compensation commence à affecter sur la mesure. L'indication des mesures des capteurs statorique et rotorique après la correction sont présentés dans la fig.IV.6.

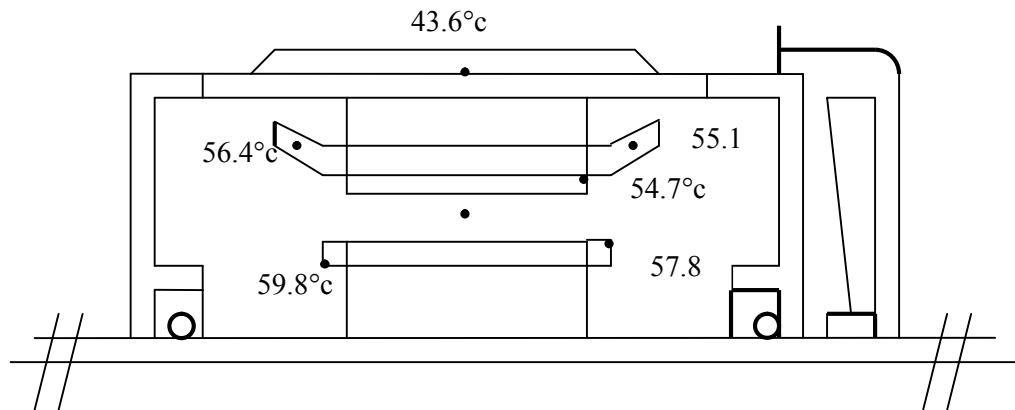


Fig.IV.6 emplacement des capteurs et indications des températures après la correction des capteurs rotorique, lors de l'essai à vide.

d-observation :

Au début de l'essai, la température ambiante est de 29°C, à la fin elle est de 30°C.

La forme de la courbe montre que la température rotorique est la plus élevée dans la machine,

La différence de température entre le point le plus chaud mesuré au rotor annaux de cours circuit coté non ventilé et le point le plus chaud dans la partie statorique qui est la tête de bobine coté non ventilé est de 3.6°C.

La différence de température entre le point le plus chaud annaux de cours circuit rotorique et le point le moins chaud dans la machine qui est la carcasse est de 16.4°C.

A la fin de l'essai d'échauffement on lit les différentes valeurs sur les appareils de mesure qui sont présentés dans le tableau suivant :

Tension entre Phase (U)	Courant de ligne (I)			Puissance absorbée (W)
	L1	L2	L3	
360V	3.1A	3.2A	3A	180 W

Tableau. IV. 3 différentes mesures de l'essai à vide.

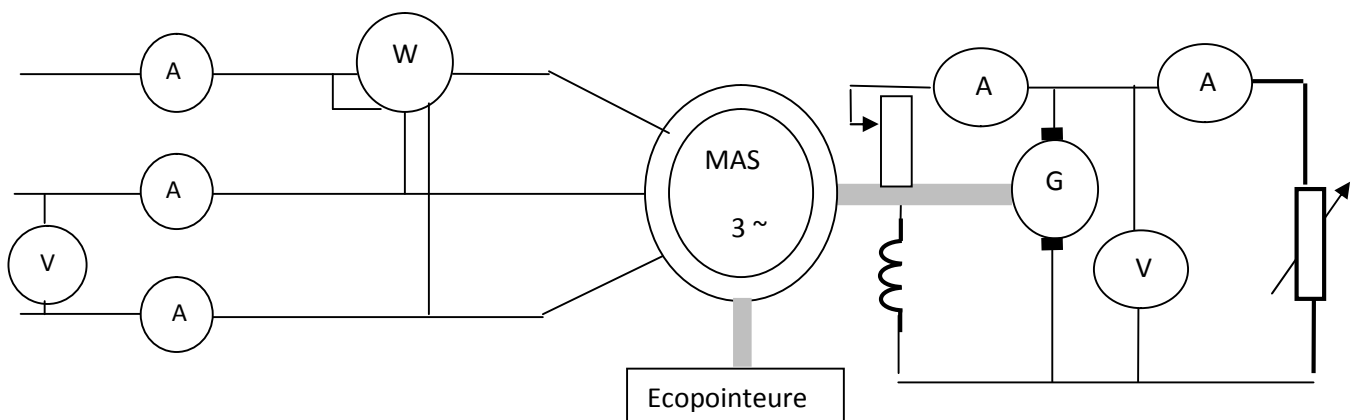
IV-7-3 Essai en charge nominale :

a-principe :

La procédure est la même que l'essai à vide, le moteur asynchrone est entraîné par la machine à courant continu est tourne à sa vitesse nominale.

Puis on arrête l'essai de rotation et on alimente le moteur couplé à la charge sous sa tension nominale.

b-schéma de montage :



FigIV.6. schéma de montage de l'essai en charge.

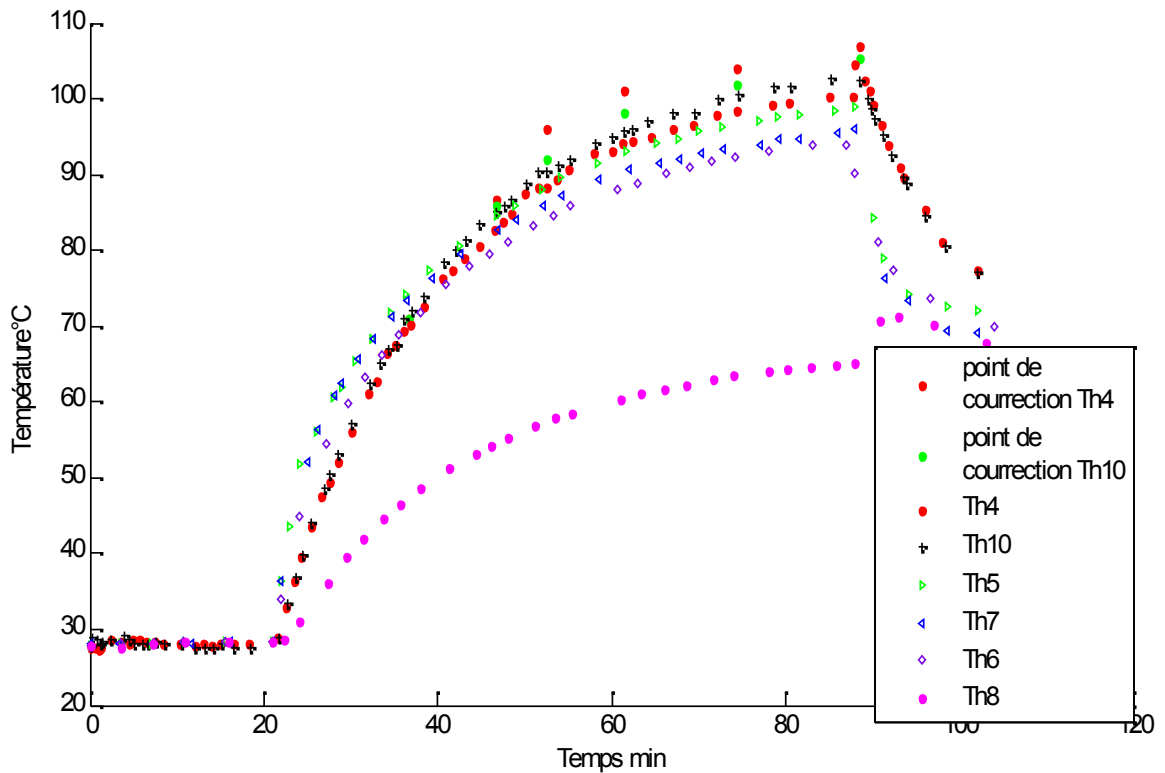


Fig.IV.7 Courbe de l'échauffement et de refroidissement lors de l'essai en charge

c- Correction des capteurs rotorique :

Les courbes des thermocouples rotorique pendant l'essai de rotation non pas présenté une grande erreur de mesure par rapport aux autres capteurs de la partie statorique.

Pendant l'essai d'échauffement la courbe du capteur Th4 et celle de Th10 présente les mêmes valeurs de température. A partir de 70°C d'échauffement de moteur le capteur Th10 dépasse le capteur Th4 de 1°C jusqu'à la fin. Puis juste à l'arrêt du moteur, la mesure du capteur Th4 augmente de 100.3°C à 104.5°C. Le capteur Th10 augmente de 101.6°C à 102.4 °C. Le capteur Th4 est moins compenser que le capteur Th10.

Comme l'échauffement dans cet essai atteint les 100°C, donc on fait intervenir l'essai en court circuit pour la correction. A chaque point mesuré par les capteurs Th4 et T10 on le courgée par rapport à la mesure juste après l'arrêt qui es l'équivalent de la même mesure avec l'essai en court circuit. Cette valeur sera corrigée par l'essai en court circuit sans le système bagues balais. la Fig.IV.7 montre les mesures des capteurs statorique et celle des capteurs rotorique corrigée.

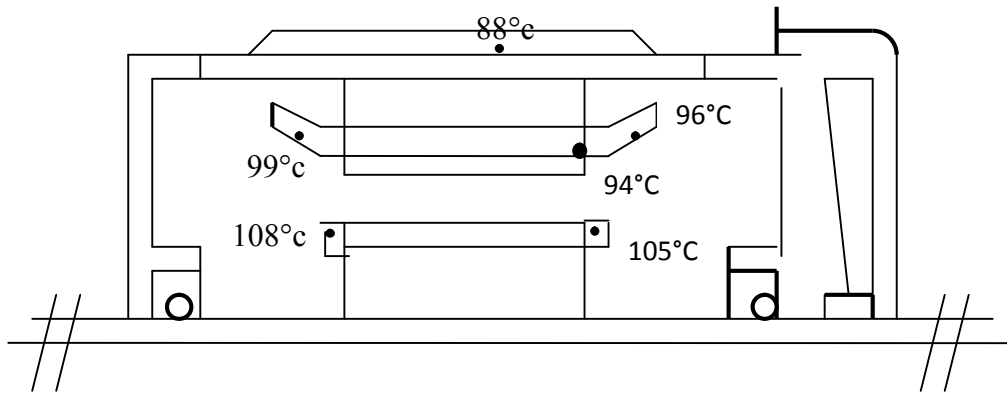


Fig.IV.7 emplacement des capteurs et indications des températures après la correction des capteurs rotorique, lors de l'essai en charge.

d-Observation :

Au début de l'essai, la température ambiante est de 29°C, et elle est de 30°C à la fin.

La forme de la courbe montre que l'échauffement rotorique est le plus élevé dans la machine,

La mesure de température dans cet essai est la plus élevée que l'essai à vide. Celle de rotor annaux de court circuit coté non ventilé est de 108°C. la tête de bobine coté non ventilé est de 99°C, avec un écart de 9°C comparant au rotor

La différence de température entre le point le plus chaud au rotor annaux de court-circuit rotorique et le point le moins chaud dans la machine qui est la carcasse est de 19°C.

A la fin de l'essai d'échauffement on a lis les déférentes valeurs sur les appareils de mesure qui sons présenté dans le tableau suivant :

Tension entre Phase (U)	Courant de ligne (I)			Puissance absorbée (W)
	L1	L2	L3	
360V	5.2A	5.5A	5.3A	2430 W

Tableau. IV. 3 différentes mesures de l'essai en charge.

IV-8 Mesure de la température rotorique par la caméra infrarouge :

IV-8-1 présentation de la caméra infrarouge :

La camera utilisé da ce travail est une caméra infrarouge C.A 1879, elle est représentée comme suit :

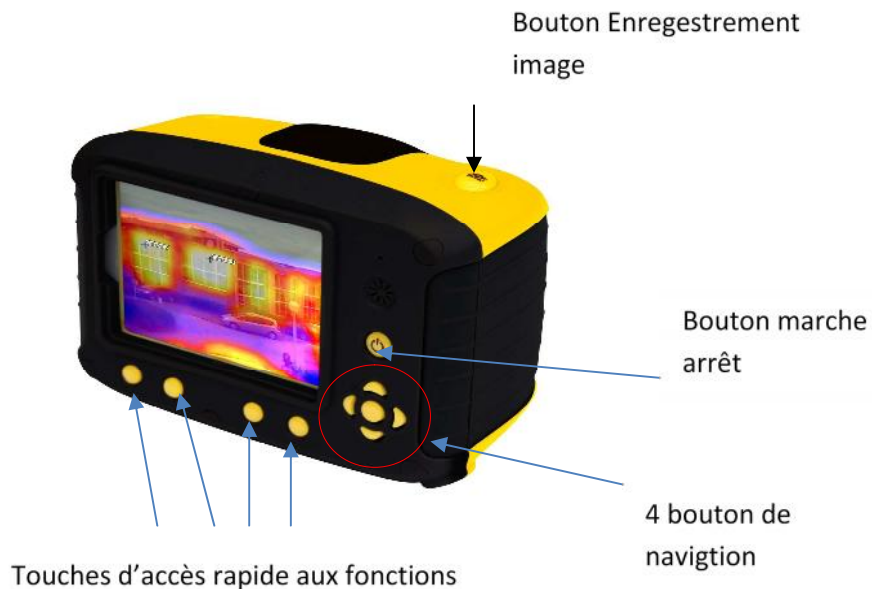


Fig.IV.8 Principale caractéristique de caméra

Comme tous les appareils, la caméra infrarouge nous permet d'effectuer plusieurs réglages dans son menu principal pour mesurer la température d'une façon correcte.

Les principaux réglages qui doivent être faits avant la mesure sont le réglage de l'émissivité thermique qui dépend de la nature des matériaux, et la température réfléchi qui est la température ambiante.

La caméra dispose d'un logiciel DiaC Amreport, sur lequel on trouve toutes les notions de fonctionnement de l'appareil.

La caméra nous permet d'avoir une image thermique externe de la machine. Pour l'exploiter au régime transitoire il suffit de prendre une image à plusieurs instants de ce régime.

Le logiciel nous permet de faire les réglages nécessaires pour chaque mesure et pour les différents endroits considérés, car les matériaux qui constituent la machine sont différents.

Chapitre IV: Mesure expérimentale de la température d'une machine asynchrone

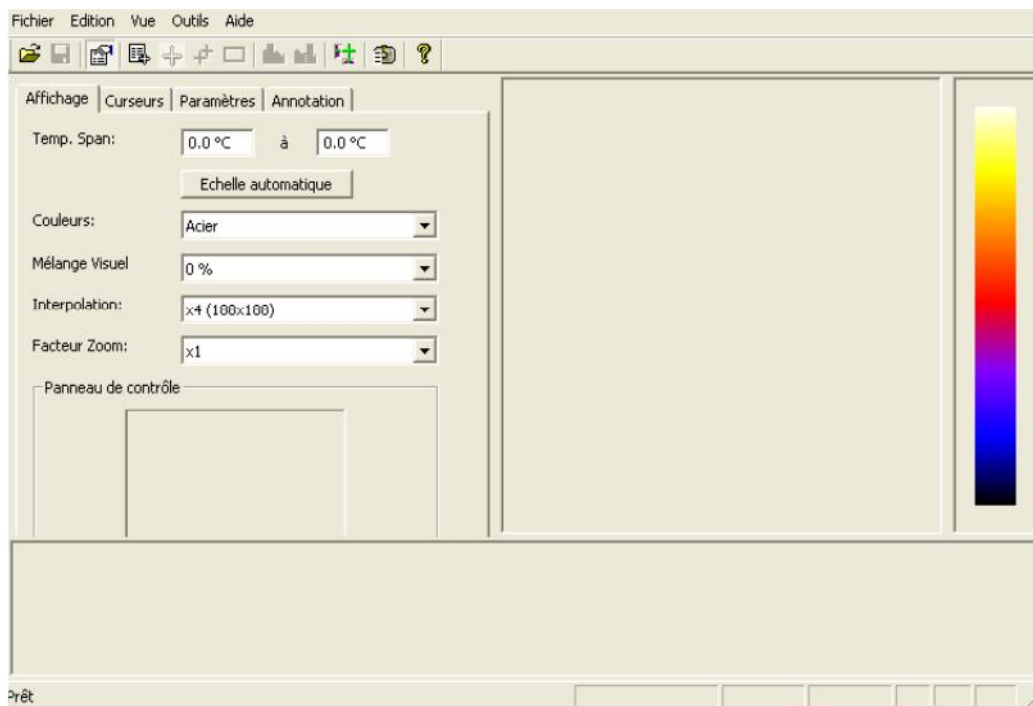


Fig.IV.9 fenêtre principale de logiciel.

Ainsi, la fenêtre principale nous permet de sélectionner l'image prise par la camera et de voir son état d'échauffement après avoir réalisé les différents réglages nécessaires.

Un clic sur le menu déroulant fichier puis sur ouvrir, une fois le dossier localisé on clique sur l'image choisie, et ce présent comme suit :

Chapitre IV: Mesure expérimentale de la température d'une machine asynchrone

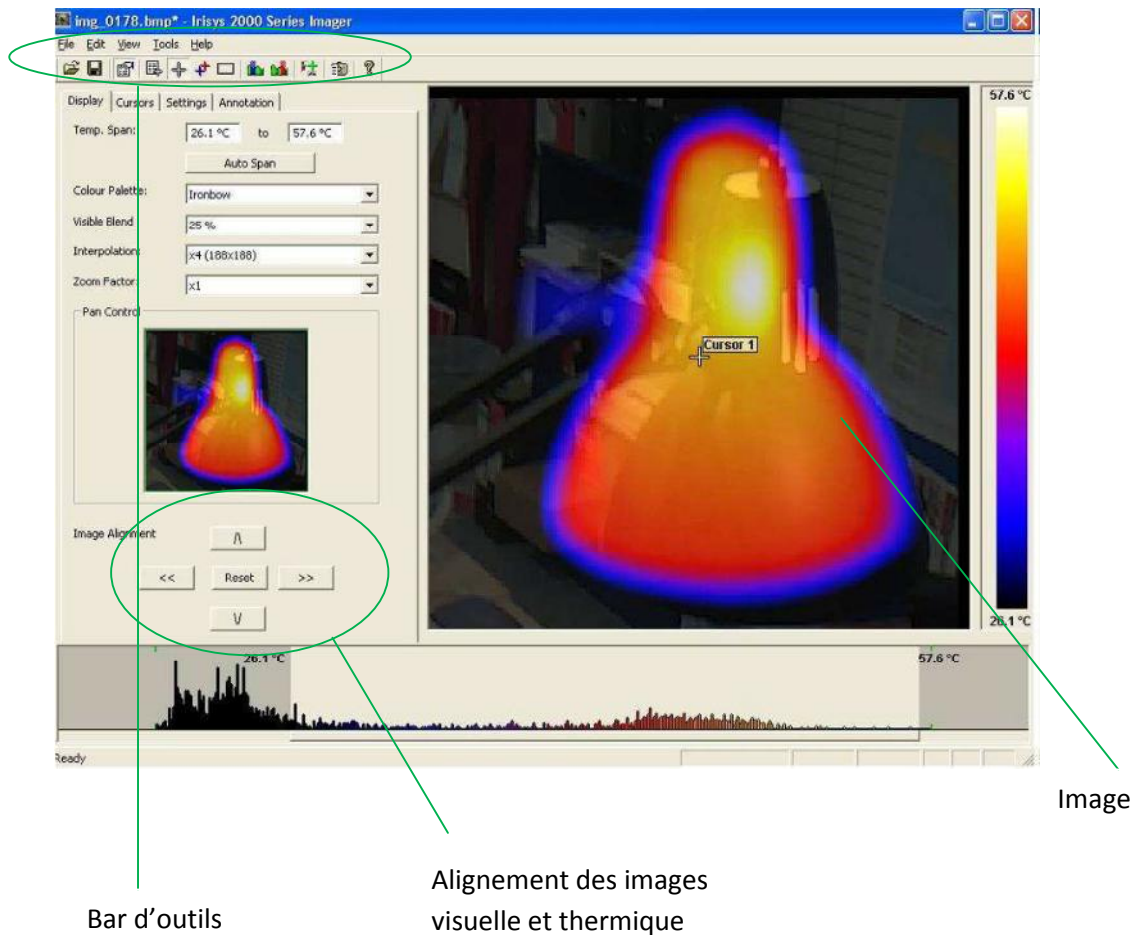
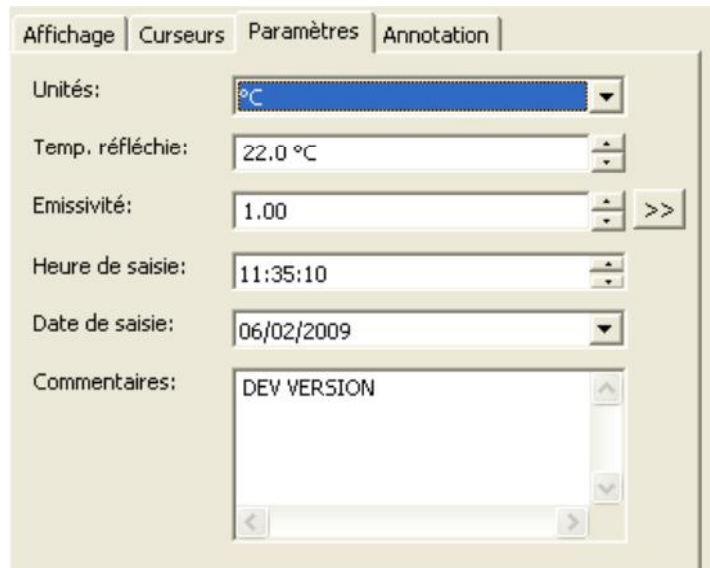


Fig.IV.10 Image thermique

Une fois l'image est sélectionnée on commence par l'alignement de l'image thermique et l'image réelle, pour que l'alignement soit correcte la case mélange visuel, il faut qu'il soit réglée à 50% image thermique 50% image réelle.

Une fois l'alignement fait on peut régler le mélange visuel à 100 % pour que l'image réelle soit claire.

Puis en haut de la fenêtre on voit l'angle suivant :



FigIV.11 Angle de sélection

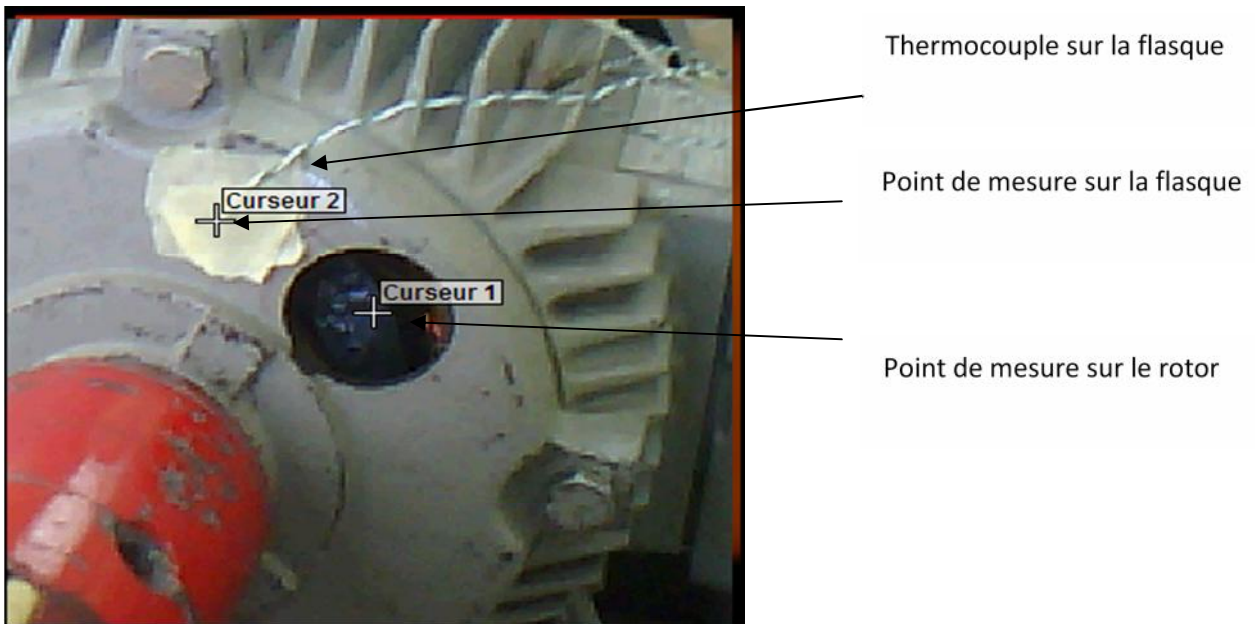
L'angle paramètre nous permet de régler, la température réfléchie à la température ambiante, l'émissivité de 0 à 1, pour un corps noir l'émissivité égale à 1. Pour les autres matières chaque matière à sa propre émissivité qui dépend de l'état de surface du corps et la longueur d'rayonnement, aussi elle nous permet de définir l'instant où l'image est prise.

Dans notre cas on a réglé l'émissivité à 0.94 pour la carcasse avec peinture. Cette valeur tirée directement dans l'angle d'émissivité. Pour l'anneau de court-circuit elle est fixée à 0.84 cette valeur est équivalente à l'émissivité de l'Aluminium abrasé.

IV-8-2 Essai en court circuit :

On procède de la même manière que l'essai à rotor bloqué avec système bagues balais et on utilise la caméra pour les mesures du rotor et de la flasque.

On place un capteur (Th3) sur la flasque pour avoir une référence pour la caméra, et dans les mêmes conditions de mesure.



IV.12 image de la machine avec les points de mesure de température.

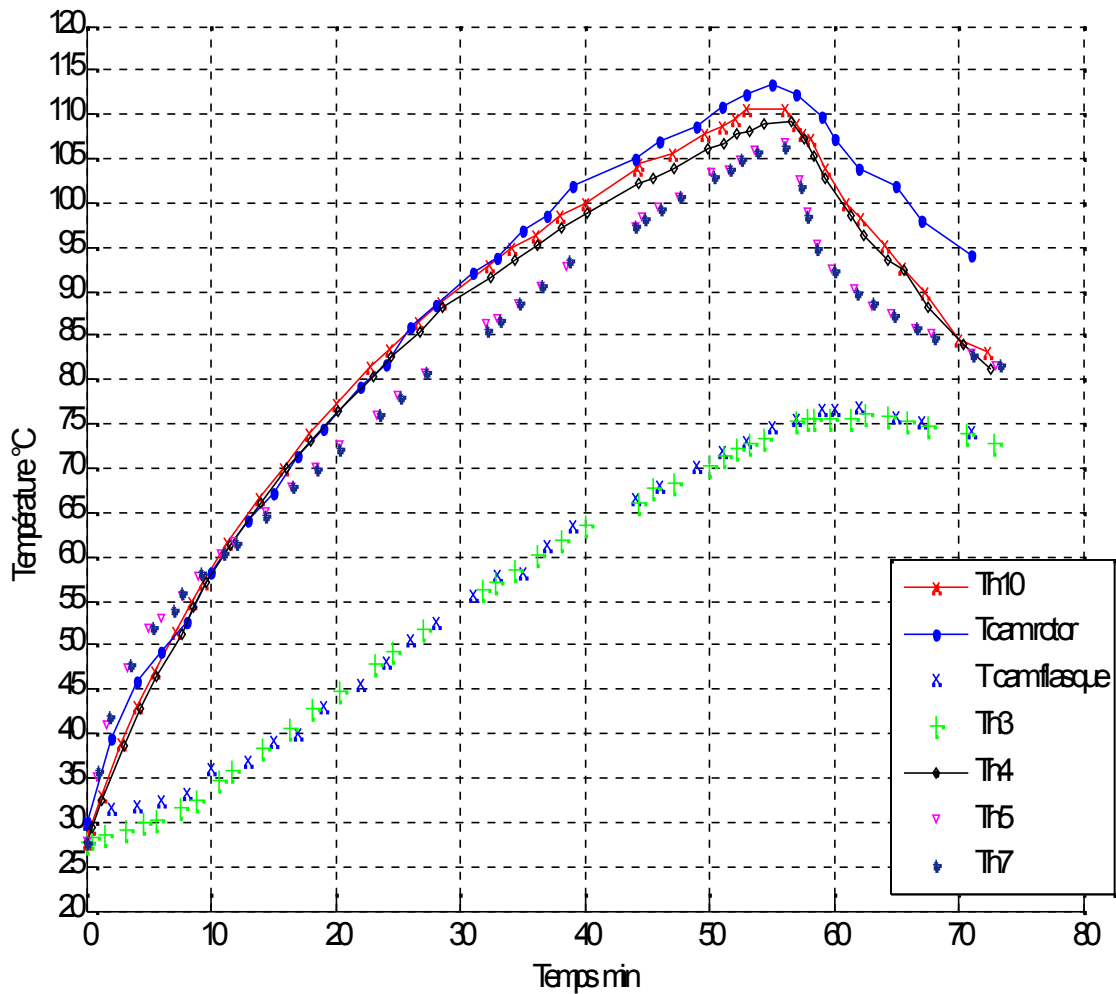


Fig.IV.8 Courbe de l'échauffement et de refroidissement lors de l'essai en court-circuit avec capteurs et caméra.

a-Observation :

La courbe à reproduit la même forme que l'essai déjà fait à rotor bloqué, sauf que les capteurs rotoriques présentent un écart de mesure du début jusqu'à la fin d'échauffement, cela peut être due aux manipulations sur la machine et l'état de contact de système bague-balais peut être changé, or que les courbe des têtes de bobines on reproduits une forme identique.

Pour les courbe de la camera celle de la flasque est la même que le capteur Th3 sauf que ou début il y a un écart de mesure. Pour la courbe rotorique, au début elle est la même que les capteurs rotorique. Mais après 90°C d'échauffement elle commence à dépasser les capteurs rotoriques. La courbe de la camera au rotor et proche de celle des capteurs rotoriques sans système bagues et balais.

Chapitre IV: Mesure expérimentale de la température d'une machine asynchrone

A la fin de l'essai la camera atteint 113°C, le capteur Th10 atteint 110°C, l'écart est de 3°C qui est le même que les deux essais en court-circuit précédant.

Au début de l'essai, la température ambiante est de 29°C, et elle est de 30°C à la fin. Avant l'arrêt de l'essai d'échauffement on lit les différentes valeurs sur les appareils de mesure qui sont présentes dans le tableau suivant :

Tension entre Phase (U)	Courant de ligne (I)			Puissance absorbée (W)
	L1	L2	L3	
67V	4.5A	4.7A	4.6A	320 W

Tableau. IV. 4 différentes mesures de l'essai en court-circuit.

IV-8-3 essai à vide et en charge avec camera:

Comme les essais thermique sur la machine électrique dépendent de plusieurs paramètres, la température ambiante, le réseau d'alimentation etc. les mesures ne pouvant être jamais les mêmes d'un essai à l'autre, de ce fait l'essai à vide et en charge on mesure la température au même temps pour la caméra et les capteurs.

En procédant de la même façon que l'essai à vide précédent on utilisant la caméra thermique pour les mesures rotoriques est la flasque. Plus un thermocouple (Th3) sur la flasque sert de référence à la caméra.

a-essai à vide :

En procédant de la même façon que l'essai à vide et en charge précédent on utilisant la caméra thermique pour les mesures rotoriques est la flasque. Plus un thermocouple (Th3) sur la flasque sert de référence à la caméra.

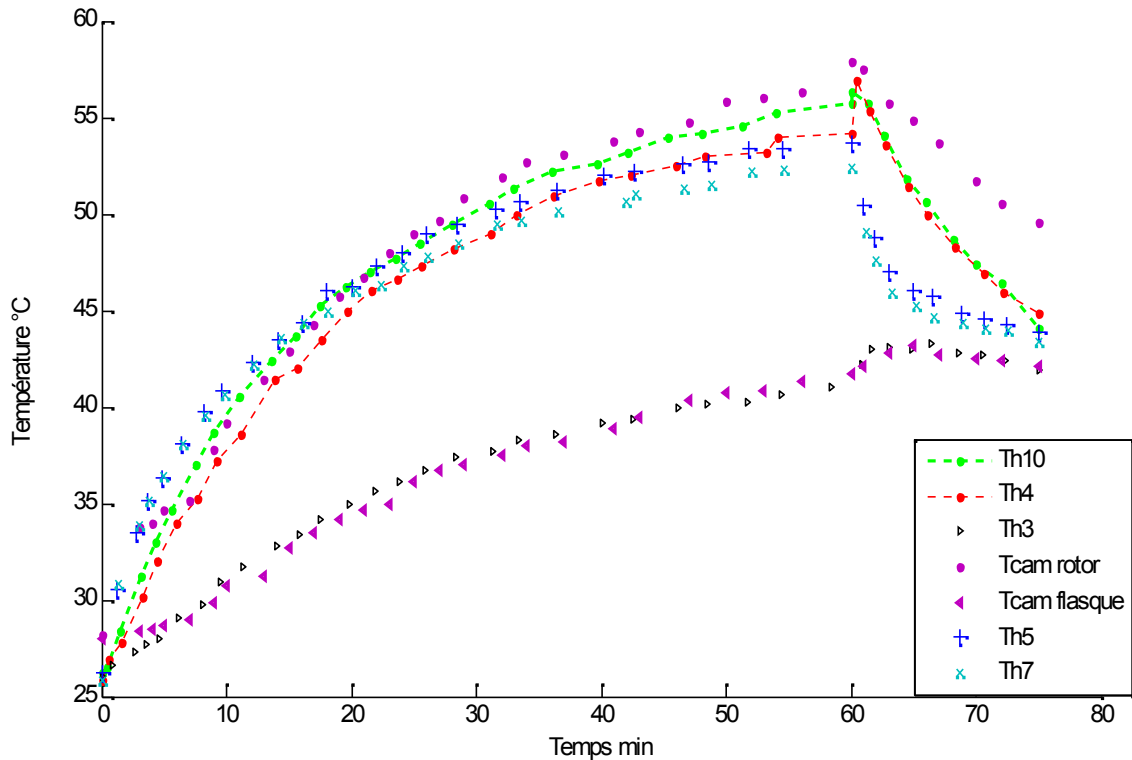


Fig.IV.9 Courbe de l'échauffement et de refroidissement lors de l'essai à vide avec caméra

a-1 Observation :

Le capteur Th4 est moins compensé que le capteur Th10, comme l'essai à vide précédent, juste à l'arrêt de l'essai le capteur Th4 augmente de 54.2°C à 56.9°C et le capteur Th10 atteint 56.3°C.

Pour les courbes de la caméra, celle de la flasque prend la même forme que le capteur Th3. Pour la courbe rotorique au début, elle est la même que les capteurs rotoriques.

À la fin de l'essai, la caméra atteint 57.9°C. De sorte que les points de correction pour les mesures de capteur Th4 sont proches de la forme de la courbe par caméra thermique du rotor.

À la fin de l'essai d'échauffement, on lit les différentes valeurs sur les appareils de mesure qui sont présentes dans le tableau suivant :

Tension entre Phase (U)	Courant de ligne (I)			Puissance absorbée (W)
	L1	L2	L3	
360V	3.1A	3.2A	3A	180 W

Tableau. IV. 4 différentes mesures de l'essai à vide avec caméra.

b-essai en charge :

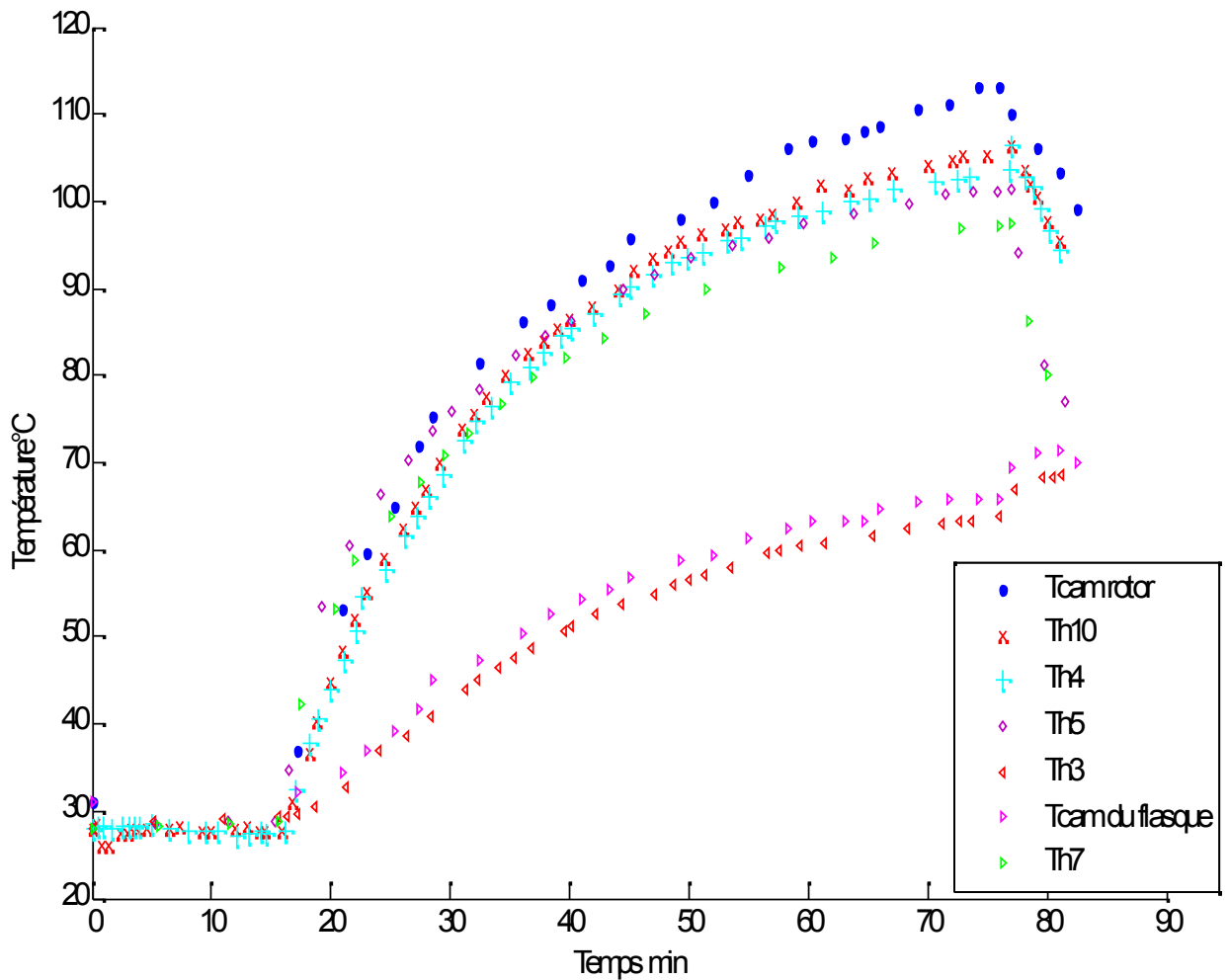


Fig.IV.10 Courbe de l'échauffement et de refroidissement lors de l'essai en charge avec caméra

Chapitre IV: Mesure expérimentale de la température d'une machine asynchrone

b-1-Observation

La courbe à reproduit la même forme que l'essai en charge précédent, le capteur Th4 est moins compenser que le capteur Th10, juste à l'arrêt de l'essai le capteur Th4 augmente de 103°C à 106.5°C et le capteur Th10 atteints 106.3°C .

Pour les courbe de la camera celle de la flasque prend la même forme que le capteur Th3 avec un écart de mesure qui est presque le même de début jusqu' à la fin de la courbe. Pour la courbe rotorique au début elle est la même que les capteurs rotorique. Après 50°C d'échauffement commence à dépasser les capteurs rotoriques. La courbe rotorique par camera a pris la même forme que les points corriger.

À la fin de l'essai la camera atteint 113°C le capteur Th4 atteint 106.5°C, la correction de cette mesure par rapport à l'essai en court-circuit et de l'ordre de 109.6°C. De la sorte les points de correction pour les mesures de capteur Th4 sont proches de la forme de la courbe par caméra thermique du rotor.

Au début de l'essai, la température ambiante est de 28°C, et elle est de 30°C à la fin.

A la fin de l'essai d'échauffement on lit les différentes valeurs sur les appareils de mesure qui sont présentes dans le tableau suivant :

Tension entre Phase (U)	Courant de ligne (I)			Puissance absorbée (W)
	L1	L2	L3	
366V	5.2A	5.6A	5.4A	2475 W

Tableau. IV. 5 différentes mesures de l'essai en charge avec caméra.

IV-9 Interprétation des résultats :

L'augmentation de la chaleur nécessite une énergie de plus en plus importante, cependant, les pertes, étant les sources de la chaleur de température, sont supposées constantes dans le temps en fonction de l'essai. Ceci engendre la stabilisation de la température au bout d'un certain temps qui représente la constante de temps d'un élément actif de la machine

Les thermocouples logés dans la partie rotorique de la machine enregistrant la plus haute température comparée à celle de la partie fixe de la machine. L'essai en cour circuit nous a confirmé que le rotor est le plus chaud dans la machine puits les têtes de bobines, on ces bien

Chapitre IV: Mesure expérimentale de la température d'une machine asynchrone

que la ventilation agit sur la stabilité thermique entre la source et le milieu ambiant d'une façon non uniforme, donc l'écart thermique entre les différentes parties de la machine dépend aussi de la source.

Lors de l'essai à vide et en charge les capteurs rotoriques nous ont introduit des erreurs de mesure d'une manière inverse le capteur coté non ventilé est soumis à des erreurs de mesure plus importantes que le coté ventilé. Ceci est prévisible, il s'explique essentiellement par la différence de compensation entre les capteurs. La correction de ces mesures est basée sur la rotation du système mécanique pour l'essai à vide plus l'essai en court circuit pour l'essai en charge.

Pour l'essai en charge la courbe par caméra dans la partie rotorique nous a reproduit une forme proche de celle corrigée sur la partie rotorique, et une forme très proche de celle de la flasque par le thermocouple, ceci peut confirmer que le rotor est le plus chaud dans la machine.

Les thermocouples placés au niveau des têtes de bobine enregistrent la température plus élevée par rapport aux autres parties statoriques, le coté non ventilé enregistre les plus hautes comparé à ceux du coté ventilé.

IV-10 Conclusion :

Ce chapitre est consacré aux essais expérimentaux. Dans un premier lieu des mesures préliminaires sur les appareils de mesure et les capteurs sont effectuées. En suite des mesures de la température par des thermocouples pour les différents essais et la caméra infrarouge comme une deuxième méthode pour la mesure de la température rotorique. Les résultats obtenus par caméra concorde à celle du capteur placé sur la flasque. Aux niveaux de rotor les capteurs introduisant des erreurs de mesure qui sont limités à un nombre de degrés minime par rapport à la mesure elle-même. Les mesures rotoriques par caméra sont proches de celles corrigées pour le capteur coté non ventilé.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'étude que nous avons élaborée nous a permis d'approfondir nos connaissances dans le domaine des machines électriques et en particulier celui de la machine asynchrone. De point de vue thermique.

Notre travail a été consacré à la mesure de la température rotorique d'une machine asynchrone, alimentée par une source sinusoïdale. En utilise un dispositif de mesure de température (ECOPOINTEUR) et une caméra infrarouge plus un banc d'essai réalisé au sein du laboratoire de machine électrique de la faculté de génie électrique.

Nous avons commencé par développer une analyse des différentes pertes d'énergie dans la machine électrique, ainsi que les différents modes de transferts de la chaleur et les différentes méthodes d'étude de comportement thermique de ces machines.

Ensuite on a présenté les différents moyens de mesure de la température dans les machines électriques.

En parallèle cette étude nous à permet d'évaluer aussi les erreurs de mesure des différents appareils et les thermocouples par l'essai d'étalonnage et des essais préliminaires. Cela, afin de pouvoir corriger la température rotorique plus précisément.

Les résultats obtenue montre que la partie tournante est la plus sensible aux élévations de la température que la partie statique de la machine, or que les résultats obtenus l'ors de l'essai à vide et en charge par la méthode contacte directe (thermocouple)à introduit des erreurs de mesure qui sont dus au thermocouple.Ces mesures sont corrigéesen se basant sur les mesures préliminaires sur les appareils. Ces correction proche aux les mesures par caméra infrarouge aux niveaux du rotor dans les conditions de fonctionnement habituelles de la machine.

Il ressort que la mesure de l'échauffement rotorique par des thermocouples ne règle pas le problème rigoureusement. En effet ce dernier est très sensible a toutes modifications de son état normalisé. Or que la caméra infrarouge informe l'état d'échauffement de la machine correctement, mais comme le rotor est à l'intérieur de la machine, l'accessibilité n'est pas toujours possible pour la camera.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] G. Rakotonirina, "modélisation thermique des machine asynchrones à cages par la méthode des éléments finis», thèse doctorat en génie électrique université Québec, avril 2001.
- [2] ABED M. A., REBHI W., " modélisation thermique d'un moteur asynchrone triphasé à cage, " mémoire de fin d'étude master électrotechnique, 2013.
- [3] N. LARKECHE, K. MAHMOUDI, "mesures expérimentales de l'échauffement d'une machine asynchrone à cage, " mémoire de fin d'étude DEUA électrotechnique, 2006.
- [4] M. AZZOUG, M.ZERIFI "étude expérimentale de l'échauffement d'un moteur asynchrone a cage de puissance 7.5 kW "mémoire d'ingénieur, U.M.M.T.O, 2003.
- [5] G. GRELLET, "pertes dans les machine tournantes», technique de l'ingénieur, traité de génie électrique, 1985.
- [6] WIDED D., "conception et dimensionnement des machines asynchrones de petite moyenne puissance" thèse doctorat en science technique école polytechnique fédérale de Lausanne, 2001.
- [7] MOULAI ZAZI D, "contribution à l'étude thermique des machines asynchrones alimentées par des convertisseurs électriques "mémoire de magister U.M.M.T.O, 2002.
- [8] Nobru ICHINOSE Tetsuji KOBAYASHI, « guide pratique des capteurs » maison paris 1990.
- [9] M. BELMOKDAD, S. BERRAH, "étude expérimentale thermique d'un moteur asynchrone auto-ventilé", mémoire de fin d'étude master électrotechnique, 2013.
- [10] CHERIER Mouhemed Kamal, « étude théorique et expérimental de l'isolation thermique intérieur d'un habitat dans la région de ghardaia », mémoire de magister université aboubeker belkaid de tlemcen, 2010.
- [11] JUMO GmbH, CO. KG Fulda « Mesure électriques de la température avec de thermocouple et des sonde à résistance » Dipl.-phys. matthias. nau., février 2003.
- [12] J. Rogez, J. Le Coze « mesure de température », Technique de l'ingénieur, R2515.
- [13] Marc FERRETTI, « Mesure et contrôles industriels », EME, Paris, 1977.
- [14] N. HARIRECHE, A. IMERZOUKENE, « étude expérimentale de l'échauffement d'un moteur asynchrone », mémoire d'ingénieur, U.M.M.T.O, 2000.
- [15] GEORGES ASCH « les capteurs en instrumentation industrielle », Dunod, paris, 1999.

ANNEXE A

Caractéristique de la machine étudiée

A.1 Caractéristique nominale de la machine[2] :

Caractéristiques	valeurs	unités
Puissance utile	2,2	Kw
Nombre de phases	3	-
Fréquence d'alimentation	50	Hz
Vitesse de rotation	1500	Tr/min
Glissement	4,6	%
Tentions d'alimentation	380	V
Connexion des enroulements	Triangle(Δ)	-
Courant absorbé	5.2	Δ
Facteur de puissance	0.83	-
Rendement	78	%
Résistance d'une phase au stator 20°C	7 ,63	Ω
Hauteur d'axe	100	mm
Couple nominale	15	N .m
Couple démarrage / couple nominale	2,3	-
Couple max/couple nominale	2,6	-
Courant démarrage/ courant nominale	5,9	-

Tableau A .1. Caractéristique nominale de la machine étudiée

ANNEXE B

Différent type de thermocouples et leurs caractéristiques

Annex b deferent type de thermocouples et lers caracterstique

B.1 Défèrent type de thermocouple :

Cuivre /constantan type T (diamètre 1,63 mm)	-270°C à 370°C	-6,258 à 19,027	±2% de -100°C à -40°C ±0.8% de -40°C à 100°C ±0.75% de 400°C à 800°C
Fer/constantan Type j (diamètre 3.25 mm)	-27°C à 800°C	-8.096 à 45.498	±3% de 0°C à 400°C ±0.75% de 400°C à 800°C
Chromel /alummel Type k (diamètre 3.25mm)	-270 à 1250°C	-5.354 à 50.636	±3°C de 0°C à 400°C ±0.75% de 400°C à 1250°C
Chromel /constantan Type E (diamètre 3.25mm)	-270°C à 870°C	-9.835 à 66.473	±3°C de 0°C à 600°C ±0.75% de 400°C à 870°C
Platine-Rhodium (10%) /platine Type s (Diamètre 0.51mm)	-50°C à 1500°C	-0.236 à 15.576	±2.5°C de 0°C à 600°C ±0.4% de 600°C à 1500°C
Platine-rhodium (13%) /platine Type R (diamètre 0.51mm)	-50°C à 1500°C	-0.226 à 17.445	±1.4°C de 0°C à 538°C ±2.5% de 358°C à 1500°C
Platine-Rhodium (30%)/ Platine-Rhodium (6%) Type B (diamètre 0.51mm)	0°C à 1700°C	0 à 12.426	±0.5% de 870°C à 1700°C (3)
Tungstène-Rhodium (5%) Tungstène-Rhodium (26%)	0 °c à 2760°C	0 à 38.45	

- (1) Norme NF C 42-321
- (2) Norme NF E 18-001
- (3) Norme ANSI c 96-6

Tableaux III.1 différent type des thermocouples [9]

B.2 table de thermocouple à la température de référence 0°C

THERMOCOUPLE TYPE K. *NICKEL - CHROME / NICKEL - ALUMINIUM*

°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
- 200	-5891	-6035	-6158	-6262	-6344	-6404	-6441	-6458			
- 100	-3553	-3852	-4138	-4410	-4669	-4912	-5141	-5354	-5550	-5730	-5891
- 0	0	- 392	- 777	-1156	-1527	-1889	-2243	-2586	-2920	-3242	-3553
+ 0	0	397	798	1203	1611	2022	2436	2850	3266	3681	4095
100	4095	4508	4919	5327	5733	6137	6539	6939	7338	7737	8137
200	8137	8537	8938	9341	9745	10151	10560	10969	11381	11793	12207
300	12207	12623	13039	13456	13874	14292	14712	15132	15552	15974	16395
400	16395	16818	17241	17664	18088	18513	18938	19363	19788	20214	20640
500	20640	21066	21493	21919	22346	22772	23198	23624	24050	24476	24902
600	24902	25327	25751	26176	26599	27022	27445	27867	28288	28709	29128
700	29128	29547	29965	30383	30799	31214	31629	32042	32455	32866	33277
800	33277	33686	34095	34502	34909	35314	35718	36121	36524	36925	37325
900	37325	37724	38122	38519	38915	39310	39703	40096	40488	40879	41269
1000	41269	41657	42045	42432	42817	43202	43585	43968	44349	44729	45108
1100	45108	45486	45863	46238	46612	46985	47356	47726	48095	48462	48828
1200	48828	49192	49555	49916	50276	50633	50990	51344	51697	52049	52398
1300	52398	52747	53093	53439	53782	54125	54466	54807			

Tableau B.1 La f.e.m en μV . Température en °C

