

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



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

Mémoire de Fin d'Etude de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Présenté par

BOUGRAB Massinissa

SAFIR Yacine

Thème

Réalisation d'un dispositif de mesure de la température rotorique d'un moteur asynchrone

Mémoire soutenu publiquement le 26 septembre 2018 devant le jury composé de :

M^r KIMOUCHE Abdelghani

MAA, UMMTO, Président

M^r KHALDI Rabah

MAA, UMMTO, Encadreur

M^r BOUTORA Youcef

MCA, UMMTO, Examineur

Promotion 2017/2018

Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier « DIEU » le miséricordieux, le tout-puissant qui nous a aidé et donné les ressources nécessaires pour mener à terme ce travail.

*Nos vifs remerciements vont à notre encadreur Mr **KHALDI RABAH** pour le sujet, la confiance qu'il nous a témoignée, les précieux conseils prodigués ainsi que le suivi constant tout au long de la période de la réalisation de ce travail. Nous le remercions également de nous avoir fait profiter de ses connaissances et toute son aide.*

Nos grands remerciements aux membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail, ainsi que tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Nous tenons à remercier vivement les étudiants de la promotion l'électrotechnique industrielle pour l'aide précieuse qu'ils nous ont apportée, ainsi que tous ceux qui nous ont encouragés, soutenus et apporté leur contribution pour nous permettre de mener à bien ce travail.

Nos remerciements vont également à tous nos amis étudiants de la faculté génie électrique.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail de fin d'étude à mon père, ma chère maman et à tous les membres de ma famille, qui ont sacrifié leur vie pour ma réussite et qui m'ont éclairé le chemin par leurs conseils judicieux.

J'espère qu'un jour, je pourrai leur rendre un peu de ce qu'ils ont fait pour moi, que Dieu leur prête bonheur et longue vie.

J'espère que ce travail sera un exemple de persévérance, de courage et de générosité.

Je tiens à dédier ce travail à mes ami(e)s ainsi mon binôme.

YACINE

Dédicaces

Du plus profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers.

A la mémoire de Nana Tassadit.

A MES CHÈRES PARENTS,

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon instruction et mon bien être. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez et j'espère que votre bénédiction m'accompagnera toujours.

A mon frère et mon exemple Abderrahmane, à mes sœurs Karima, Sabrina et Amel.

A ceux qui m'ont donné joie, amour et bonheur, qui m'ont encouragé et aidé pendant toute ma vie, mes deux oncles Mouloud et Yahia que j'aime énormément.

Je dédie ce travail à mes chers neveux, et nièces (Sarah, Abdellah, Aya, Ali, Ikram, Céline et Walid) .

MASSI

Sommaire

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : Généralités et pertes dans une machine asynchrone à cage d'écureuil

I.1 Introduction	3
I.2 Généralités sur la machine asynchrone.....	3
I.2.1 Présentation de la machine asynchrone.....	3
I.2.2 Constitution d'un moteur asynchrone à cage.....	3
I.2.3 Principe de fonctionnement	4
I.2.4 Le champ tournant	5
I.2.5 La vitesse de synchronisme	5
I.2.6 Le glissement.....	6
I.3 Le Bilan de puissance.....	6
I.3.1 Puissance électrique absorbée	7
I.3.2 Puissance électromagnétique.....	7
I.3.3 Puissance mécanique	7
I.3.4 Puissance utile.....	8
I.4 Les différentes pertes dans la machine asynchrone.....	8
I.4.1 Les pertes dans le circuit magnétique	8
I.4.2 Les pertes dans le circuit électrique	9
I.4.3 Pertes mécaniques	10
I.4.4 Pertes supplémentaire	10
I.5 Conclusion... ..	11

Chapitre II : Modes de transfert de chaleur et méthodes d'étude thermique

II.1 Introduction	12
II.2 Modes de transfert de chaleur	12
II.2.1 Transfert de chaleur par conduction	12
II.2.1.1 La conductivité thermique.....	13
II.2.1.2 La conductivité thermique des solides hétérogènes	13
II.2.1.3. Résistance thermique de contact	16
II.2.2 Transfert de chaleur par convection.....	17
II.2.3 Transfert de chaleur par rayonnement	17
II.3 Échange thermique dans une machine électrique	18
II.4 Méthodes d'étude thermique	19

II.4.1 Méthode expérimentale.....	20
II.4.1.1 Méthode calorimétrique	20
II.4.2 Méthodes théoriques	20
II.4.2.1 Méthode empirique	20
II.4.2.2 Méthode nodale.....	21
II.4.2.3 Méthode numérique	23
II.5 Étude de la machine asynchrone à cage en utilisant le logiciel FEMM	24
II.5.1 Présentation de la FEMM	24
II.5.2 Utilisation du logiciel FEMM.....	25
II.5.2.1 Définition du problème	25
II.5.2.2 Condition aux limites	25
II.5.3 Présentation de la structure étudiée.....	25
II.5.4 Évaluation des paramètres thermo physique.....	27
II.5.4.1 Détermination des pertes fer et des pertes mécaniques.....	27
II.5.4.2 Propriétés physiques des matériaux solides.....	32
II.5.5 Le maillage.....	33
II.5.5.1 Définition.....	33
II.5.5.2 Construction du maillage.....	33
II.5.6 Étude de la distribution de la température dans les différentes régions.....	34
II.6 Conclusion	35

Chapitre III : Moyens de mesure de température

III.1 Introduction	36
III.2 Les différentes méthodes de mesure	36
III.2.1 Méthode de mesure par contact direct.....	36
III.2.2 Méthode de mesure sans contact	36
III.2.3 Méthode de mesure mixte	36
III.3 Les capteurs de température	37
III.3.1 Choix du capteur de mesure de température	37
III.3.2 Les différentes familles des capteurs	37
III.3.3 les thermocouples	37
III.3.3.1 Constitution et principe.....	37
III.3.3.2 La température de référence d'un thermocouple	38
III.3.3.3 Différents types de thermocouple.....	40

III.3.3.4 Avantages et inconvénients des thermocouples	40
III.3.4 Les thermistances	41
III.3.4.1 Constitution et principe	41
III.3.4.2 Avantages et inconvénients des thermistances	42
III.3.5 Comparaison entre les thermocouples et les thermistances	43
III.3.6 Pyrométrie optique	43
III.3.6.1 Définition :	43
III.3.6.2 Principe physique	44
III.3.7 Caméra thermique	44
III.3.7.1 Avantages et inconvénients de la caméra thermique	45
III.3.8 Thermomètre	45
III.3.8.1 Définition	45
III.3.8.2 Les différentes sortes de thermomètres	45
III.3.9 Capteur température LM35	46
III.3.9.1 Définition	46
III.3.9.2 Caractéristiques de LM35	47
III.4 Unités de mesure de température	47
III.5 Conclusion	48

Chapitre IV : Réalisation du dispositif de mesure de température rotorique et application

IV.1 Introduction :	49
IV.2 Réalisation du projet	49
IV.2.1 Choix des instruments de mesure	51
IV.2.2 Connexion des capteurs sur la carte Arduino	52
IV.2.3 Programmation des capteurs sous Arduino	52
IV.2.4 Présentation et principe de l'essai pour l'étalonnage	52
IV.2.4.1 Définition de l'étalonnage	53
IV.2.4.2 Étalonnage des instruments de mesures	53
IV.2.5 Simulation sous le logiciel ISIS Proteus	55
IV.3 Application sur le moteur	56
IV.3.1 Présentation du moteur étudié	56
IV.3.2 Description du banc de l'essai	56
IV.3.3 Emplacement des capteurs dans le moteur asynchrone	57
IV.3.4 Isolation et mise en place des capteurs	58

IV.3.4.1 Isolations des capteurs et des files	58
IV.3.4.2 Emplacement réel des capteurs sur l'anneau du rotor	59
IV.3.5 Les différents essais expérimentaux effectués sur la machine	60
IV.3.5.1 Essai à vide	60
IV.3.5.2 Essai en charge	60
IV.3.6 Influence et perturbation sur le circuit.....	60
IV.3.6.1 Influence du système bagues balais	60
IV.3.6.2 Perturbation du signal par des parasites	61
IV.3.7 Les courbes obtenues dans les essais.....	62
IV.3.7.1 Courbes obtenues à l'aide des thermocouples	63
IV.3.7.2 Courbes obtenues à l'aide des thermistances	63
IV.3.7.3 Comparaison entre les températures mesurées par thermocouples et thermistances	65
IV.3.7.4 Comparaison entre les courbes de température rotorique relevées par les thermistances.....	65
IV.3.7.5 Figures obtenues par le traceur série à l'arrêt du moteur.....	66
IV.3.8 Comparaison entre les moyens et méthode de mesure	67
IV.4 Conclusion.....	68
Conclusion générale	69

Référence bibliographique

Annexes

Introduction générale

Le moteur asynchrone à cage est le type de moteur le plus utilisé dans l'industrie. Les raisons sont principalement liées à des critères de robustesse et du moindre entretien, au développement des moteurs à haut rendement et au développement d'alimentations électroniques performantes. Cependant, l'augmentation des puissances massiques et l'utilisation d'alimentations non purement sinusoïdales et à fréquence variable ont accru un problème de taille : les moteurs deviennent très sensibles du point de vue thermique aux fluctuations plus ou moins importantes des pertes génératrices de chaleur.

Comme leur fonctionnement est fortement conditionné par leur environnement extérieur et leur mode de fabrication, une étude rigoureuse du comportement thermique de ces moteurs est de plus en plus nécessaire. Cette tâche est difficile à cause de nombreux facteurs (dimensions et propriétés thermo-physiques très différentes des constituants, phénomènes physiques compliqués). Toutefois, avec l'évolution de la science et des technologies, l'homme a été à plusieurs reprises confronté à des problèmes liés à la température : dilatation des métaux, variation des résistances et problème des semi-conducteurs etc.... Dans ce sens est née l'idée de mesurer la température du moteur. Pour ces raisons, l'étude du comportement thermique et la connaissance de la température en tout point de la machine, la méthode expérimentale, basé sur des mesures de température dans les différentes parties de la machine, en particulier dans le rotor qui est indispensable dans toute étude thermique est utiliser.

Dans le cadre de notre projet de fin d'études, nous avons été chargés de concevoir et de réaliser un dispositif à partir d'une carte Arduino et des capteurs qui vont nous permettre de mesurer la température au niveau du rotor d'un moteur asynchrone à cage.

Ce mémoire décrit l'ensemble de notre travail. Il est constitué de la présente introduction et quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous donnons brièvement quelques définitions et les pertes dans la machine asynchrone.

Le deuxième chapitre est divisé en deux parties, dans la première partie sont décrits les modes de transfert de chaleur tandis que dans la seconde partie sont représentés les méthodes d'étude thermique.

Introduction générale

Le troisième chapitre sera consacré à décrire, en générale, les moyens de mesure de température.

Enfin le dernier chapitre est consacré à la réalisation du dispositif de mesure de température et son application à une machine asynchrone, jusqu'à la présentation des différents résultats obtenus et comparaison.

Finally, nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités et pertes

dans une machine asynchrone

I.1 Introduction

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

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

I.2 Généralités sur la machine asynchrone

I.2.1 Présentation de la machine asynchrone

La machine asynchrone ou bien la machine à induction, est une machine à courant alternatif, qui est réversible, elle peut fonctionner en génératrice ou en moteur. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de rotation du rotor est différente de celle du champ tournant statorique. Elle est beaucoup plus utilisée dans l'industrie, vu son prix le moins élevé et la facilité de son entretien.

I.2.2 Constitution d'un moteur asynchrone à cage

Le moteur asynchrone est constitué principalement de deux parties essentielles qui sont présentés dans la Figure (I.1).

- Une partie fixe appelé stator (Inducteur).
- Une partie mobile nommée rotor (Induit).

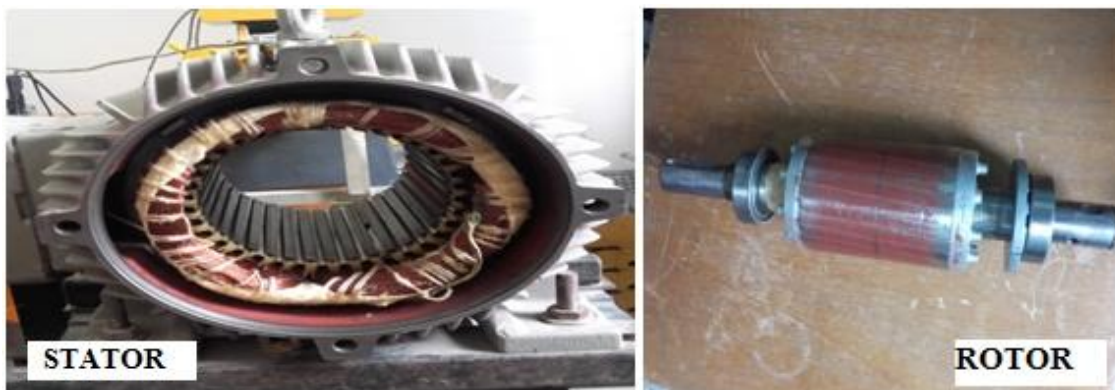


Fig I.1 Les parties essentielles de la machine asynchrone.

➤ **Le Stator**

Le stator représente l'inducteur de la machine, il comporte une carcasse généralement faite en fonte renfermant un empilage de tôles identiques qui constituent un cylindre creux. Ces tôles sont percées de trous à leurs périphéries intérieures. L'alignement de ces trous forme des encoches dans lesquelles sont placés les bobinages du stator. [1]

➤ **Le Rotor**

Le rotor est monté sur l'arbre moteur, il se compose d'un cylindre fait de tôles empilées. Des encoches sont percées à la périphérie extérieure destinées à recevoir des conducteurs. Il est séparé du stator par un entrefer très court de l'ordre de 0,2 à 2 mm seulement.

Il existe deux types de rotor : le rotor à cage d'écureuil et le rotor bobiné.

- **Rotor bobiné:**

Le rotor comporte un bobinage, généralement triphasé, composé de trois enroulements montés en étoile, logés dans les encoches d'un circuit magnétique constitué de disques empilés sur l'arbre de la machine. Les encoches du circuit magnétique sont légèrement inclinées par rapport à l'axe de la machine de façon à réduire certaines pertes dues aux harmoniques. [2]

- **Rotor à cage :**

L'enroulement du rotor à cage d'écureuil est constitué de barres de cuivre nues introduites dans les encoches, ces barres sont soudées ou rivées à chaque extrémité à deux anneaux qui les court-circuitent. L'ensemble ressemble à une cage d'écureuil d'où le nom de rotor à cage d'écureuil. Dans les moteurs de petite puissance, les barres et les anneaux sont formés d'un seul bloc d'aluminium coulé. [3]

Dans notre cas d'étude on va s'intéresser à une machine à rotor à cage d'écureuil.

I.2.3 Principe de fonctionnement

Le moteur asynchrone fonctionne en alimentant le stator par un courant électrique pour produire un champ tournant par les bobines, décalées de 120° électriques qui vont créer des forces électromotrices.

Le fonctionnement d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil réside sur les trois principes fondamentaux de l'électromagnétisme qui sont:

- La création d'un champ magnétique par un courant qui est représenté par la loi d'ampère.
- La force exercée sur un conducteur baigné dans un champ magnétique dans la loi de Laplace.

- Le troisième principe est défini par la loi de Faraday, le déplacement d'un conducteur dans un champ magnétique induit une tension.

En alimentant le stator avec des courants triphasés, les trois enroulements statorique vont créer un champ tournant (champ inducteur), alors le rotor va être balayé par ce champ, les conducteurs du rotor produisent donc la f.e.m, cette dernière produit à son tour des courants induits, ces courants vont produire un champ magnétique induit qui va s'opposé à la cause qui lui donne naissance (le déplacement de champ par rapport au conducteur de rotor). Tant que la vitesse de rotation du rotor est différente de celle du champ tournant alors il y aura une variation du champ dans chaque point du rotor. [4]

I.2.4 Le champ tournant

C'est la variation du flux magnétique créée par les courants statorique, et sa fréquence de rotation est imposée par la fréquence des courants du stator. C'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence d'alimentation électrique. [5]

La vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme Ω_s [rad/s], et elle est exprimée comme suit:

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \text{ [rad/s]} \quad \text{(I.1)}$$

Ou bien:

$$\Omega_s = \frac{2\pi N_s}{60} \quad \text{(I.2)}$$

Avec :

Ω_s : la vitesse angulaire de synchronisme [rad/s].

ω_s : pulsation électrique synchrone du champ tournant [rad/s].

N_s : vitesse de synchronisme en [tr/min].

p : nombre de paires de pôles.

I.2.5 La vitesse de synchronisme

Sur les moteurs asynchrones, la vitesse de synchronisme dépend de la fréquence d'alimentation et du nombre de paires de pôles p constituant le stator. [5]

$$N_s = \frac{60.f}{p} \quad \text{(I.3)}$$

Avec: f : Fréquence [Hz].

I.2.6 Le glissement

Il existe une différence de vitesse de rotation entre le champ tournant statorique et la vitesse mécanique du rotor. Cette différence s'appelle le glissement.

C'est la raison pour laquelle un moteur électrique fonctionnant suivant le principe que nous avons décrit est appelé " Moteur asynchrone". La différence entre la vitesse de synchronisme et celle du rotor est appelée " Glissement " et elle s'exprime en % de la vitesse de synchronisme.

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \cdot 100 \quad (\text{I.4})$$

Avec:

g : Glissement.

N : La vitesse angulaire de la rotation du rotor [rad/s].

I.3 Le Bilan de puissance

Le moteur asynchrone absorbe sur le réseau une puissance électrique active P_a , et une partie de cette puissance est dissipée par effet joule dans les enroulements du stator P_{js} . Par la suite, le champ magnétique génère les pertes dans le fer P_{fer} , par hystérésis et par courants de Foucault. Le reste de la puissance est transmise au rotor à travers l'entrefer, la majeure partie de cette puissance est alors utilisée pour produire une puissance électromagnétique P_{em} , tandis que la présence d'un courant induit dans l'enroulement du rotor, provoque des pertes joule P_{jr} .

La puissance électromagnétique fournie par le stator est responsable de la mise en mouvement du rotor, qui produit la puissance mécanique utile P_u qui sera par la suite transmise à la charge par le biais d'un arbre de transmission ou d'une courroie de distribution. Toutefois, dans le mouvement du rotor, une partie de la puissance mécanique P_m est perdue par divers mécanisme de frottement du rotor, c'est ce qu'on appelle les pertes rotationnelles P_{mec} . [6]

Le bilan de puissance dans un moteur asynchrone est reporté sur la Figure (I.2).

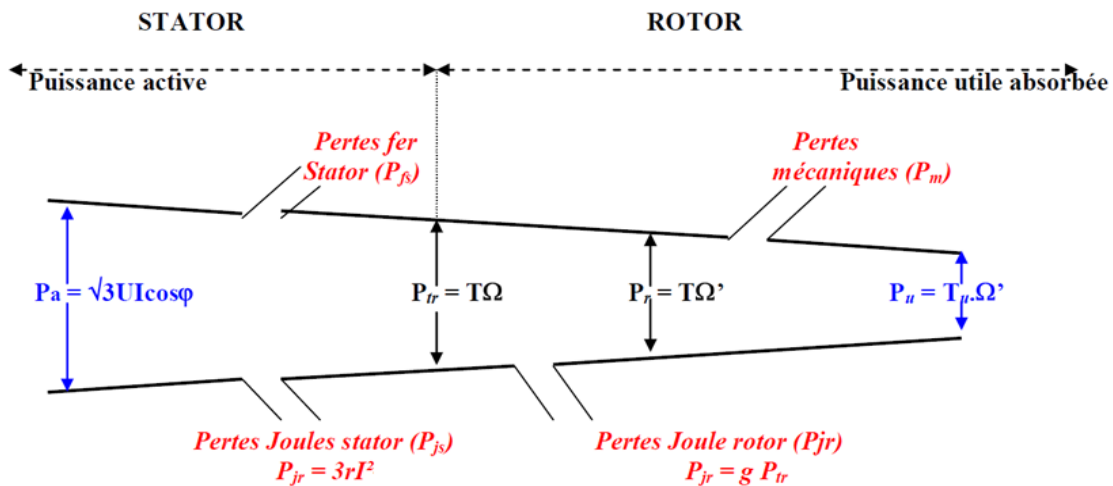


Fig I.2 Bilan de puissance de la machine asynchrone.

I.3.1 Puissance électrique absorbée

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

$$P_{ab} = \sqrt{3} U I \cos \varphi \text{ [W]} \quad (\text{I.5})$$

Avec :

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

U : La tension d'alimentation [V].

$\cos \varphi$: Facteur de puissance.

I.3.2 Puissance électromagnétique

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

$$P_{em} = P_{ab} - (P_{js} + P_{fer}) \text{ [W]} \quad (\text{I.6})$$

I.3.3 Puissance mécanique

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

$$P_m = (1 - g)P_{em} \text{ [W]} \quad (\text{I.7})$$

Avec :

P_m : La puissance mécanique [W].

I.3.4 Puissance utile

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

$$P_u = P_m - P_{mec} \quad [W] \quad (I.8)$$

I.4 Les différentes pertes dans la machine asynchrone

Dans une machine électrique, la transformation de l'énergie est inévitablement accompagnée de pertes dans les différentes parties de celle-ci. Ces pertes sont à l'origine de leur échauffement. Elles mènent à une diminution du rendement de la machine. Dans ce qui suit, nous rappelons les diverses pertes qui apparaissent dans un moteur asynchrone à cage, que ce soit à vide ou en charge, sans toutefois avoir la prétention de les classer. En effet, diverses classifications de ces pertes ont été adoptées dans la pratique. [13] [14]

I.4.1 Les pertes dans le circuit magnétique

Ce sont les pertes fer produit dans le circuit magnétique du stator qui dépendent de la tension d'alimentation et de la fréquence des courants statorique. Elles constituent les pertes par hystérésis et par courants de Foucault. Dans le rotor les pertes fer sont négligeables car la fréquence des courants rotorique est faible. [4]

1. Les pertes par hystérésis :

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

Elles sont données par la relation suivante:

$$P_{hys} = K_H * f * B_{max}^2 \quad [W/Kg]. \quad (I.9)$$

Avec:

P_{hys} : Puissance massique perdue par hystérésis [W/K].

K_h : Coefficient des pertes par hystérésis.

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

2. Les pertes par courants de Foucault

Quand un champ magnétique variable traverse un matériau conducteur massif, des forces électromotrices apparaissent ce qui engendre des courants appelés courants de Foucault. [15]

Les pertes sont données par la relation suivante :

$$P_f = K_f (e_1 * f * B_{max})^2 \quad (\text{I.10})$$

Avec:

P_f : Les pertes par courants de Foucault.

K_f : Coefficient caractéristique de la tôle.

e : Épaisseur de la tôle [m].

B_{max} : Induction maximal dans l'entrefer [T].

f : La fréquence du champ tournant.

Pour réduire les pertes par courants de Foucault, les matériaux magnétiques sont feuilletés, c'est-à-dire que ces matériaux sont remplacés par des empilements de tôles magnétiques fines disposées parallèlement à l'induction magnétique.

I.4.2 Les pertes dans le circuit électrique

Les pertes par effet Joule sont des pertes dans les circuits électriques de la machine, comme les enroulements d'induit d'excitation et plus généralement dans toutes les parties conductrices traversées par des courants. [15]

En effet, tout conducteur de résistances R parcouru par un courant continu ou alternatif de valeur efficace I , subit des pertes par effet joules en triphasé de valeur:

$$P_j = 3RI^2 \quad [\text{W}] \quad (\text{I.11})$$

La résistance R_1 de l'enroulement statorique est mesurée à une température T_1 comme (température ambiante) préalablement dans l'essai. La nouvelle valeur de cette résistance R correspondant au régime de fonctionnement est caractérisée par la température T .

R est donnée par l'expression :

$$R = R_1 \frac{T_1 + K_T}{T + K_T} \quad (\text{I.12})$$

Où :

K_T : Constante dépendant du matériau utilisé pour le bobinage (pour le cuivre $K_T=234.5^\circ\text{C}$ et pour l'aluminium $K_T=225^\circ\text{C}$).

Quand la température correspondante au régime de fonctionnement de la machine n'est pas connue, la résistance de l'enroulement est corrigée à une température déterminée selon la classe d'isolation de la machine.

Tab I.1: Températures admissibles en fonction des classes d'isolation

Classe d'isolation	Température de correction (C°)
A	75
B	95
F	115
H	130

I.4.3 Pertes mécaniques

Ce sont des pertes qui sont issues des frottements, dus à la rotation des parties tournantes de la machine. Ces pertes peuvent être divisées en deux contributions: d'une part les pertes par frottement entre solides et frottement, entre solides et fluides, et d'une autre part les pertes par ventilation.

➤ **Les pertes par frottement :**

Les contacts des corps roulant (rotor) avec les organes fixes (paliers, balais) provoquent des pertes d'échauffement, ces pertes dépendent de nombreux facteurs comme les charges appliquées sur les enroulements, le type de lubrification (graisse, huile), le type du roulement, elles correspondent respectivement aux dissipations dans les roulements et aux dissipations visqueuses dans la machine, mais il est difficile de prédire la valeur de ces pertes.

[14] [8]

➤ **Les pertes par ventilation :**

Le ventilateur est monté au bout de l'arbre de machine pour refroidir la machine, il consomme une puissance qui est estimé comme une perte d'énergie.

En pratique on ne peut pas séparer les pertes mécaniques (par frottement et par ventilation) dans une machine puisque elles sont dues à la rotation, mais on peut le faire à basse vitesse puisque dans ce cas, les pertes par ventilation sont négligeables donc on aura que les pertes par frottement.

I.4.4 Pertes supplémentaire

Elles sont définies comme étant des pertes additionnelles qui surviennent lors de la mise en charge du moteur. En alimentation sinusoïdale, elles ont comme origine le flux fondamental et la présence des flux d'harmoniques supérieurs dus à la denture, à la saturation...etc. Suivant le cas, elles se localisent principalement dans les dents, dans les armatures, les barres et anneaux et les tôles d'extrémités. [11]

En pratique on trouve des pertes qu'on ne peut pas maîtriser, qui sont dues à des phénomènes parasites comme le flux de fuite, à la fréquence fondamentale et harmonique.

➤ **Pertes supplémentaires à fréquence harmonique:**

Ce sont les pertes fer supplémentaires, ces pertes sont dues essentiellement à deux causes, qui sont: Les variations de la permanence de l'entrefer et la déformation de la force magnétomotrice.

➤ **Pertes supplémentaires à fréquence fondamentale:**

Ce sont des pertes créées par les différents flux de fuite existant dans la machine. Elles sont approximativement proportionnelles au carré du courant statorique.

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

Il crée des pertes par effet pelliculaires dans les conducteurs du stator et dans la cage du rotor. Pour les moteurs à faible puissance, ces pertes sont négligeables.

- **Flux de fuite des têtes de bobines:**

Il crée des pertes d'extrémités par induction dans les tôles de capotage, les flasques et autres parties métalliques, ainsi que des pertes dans le cuivre des conducteurs statorique et dans les anneaux du rotor.

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

L'inclinaison des encoches du rotor a pour effet le déphasage dans l'espace des forces magnétomotrices du stator et du rotor, mais elles introduisent en même temps des pertes entre les barres et le fer rotorique, dues aux différences de potentiel (D.D.P) harmoniques qui apparaissent entre les barreaux.

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons établi une description de la machine asynchrone et sa structure (les différents types du rotor, et son principe de fonctionnement). Et nous avons exposé les différentes pertes existantes dans le moteur asynchrone étudié, une connaissance exacte de la distribution des pertes est indispensable pour le calcul de l'élévation de la température qui forme l'un des objectifs majeurs de la modélisation thermique.

En conclure aussi que ces pertes ne sont pas toutes faciles à déterminer particulièrement les pertes fer et les pertes supplémentaires, constituant toujours un problème d'actualité.

Chapitre II

Modes de transfert de chaleur
et méthodes d'étude thermique.

II.1 Introduction

L'échauffement des machines électriques met à contribution des phénomènes électromagnétiques, mécaniques et thermiques. Pour chaque phénomène, il existe de nombreux points de vue donc autant de modèles à appliquer, chacun a une utilité particulière.

Une machine asynchrone et son environnement définissent un système constitué d'un fluide et d'un corps solide, dans lequel le passage du courant électrique et le mouvement de rotation lors de la conversion de l'énergie électromagnétique s'accompagne aussi des pertes d'énergie qui se transforme en énergie calorifique, ceci se traduit par une élévation de la température dans les différentes parties sensibles de la machine.

Dans ce chapitre nous présentons une description des divers modes de transmission de la chaleur (Conduction, convection et rayonnement) ainsi que les méthodes d'étude thermique.

II.2 Modes de transfert de chaleur

Le transfert de chaleur se fait essentiellement par conduction thermique des parties actives interne vers le milieu ambiant, où la dissipation de cette production de chaleur est régie par trois modes de transfert de chaleur, par conduction, par convection et par rayonnement. [7]

Le transfert de chaleur est l'un des modes les plus communs d'échange d'énergie, il intervient naturellement entre deux systèmes dès qu'il existe entre eux une différence de température et cela quelque soit le milieu.

II.2.1 Transfert de chaleur par conduction

Le processus de conduction résulte d'un transfert de chaleur des parties les plus chaudes d'un corps, vers les parties les plus froides. La température tend à s'uniformiser lorsqu'il y a l'équilibre thermique, c'est un mode de transfert qui se produit sans transport de matière.

Le transfert de la chaleur par conduction est un transport de chaleur dans un milieu solide immobile ou mobile sans remous turbulent. Ce mode de transport de chaleur est le seul à exister au sein d'un solide opaque, aussi la conduction concerne essentiellement les solides. Le flux de chaleur (dimension W/m²) transféré par conduction dans une direction donnée est proportionnel au gradient de température dans cette direction, on dit que ce transfert est caractérisé dans un milieu homogène selon la loi de Fourier qui relie la densité de flux de chaleur au gradient de température. [16] [24]

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

Ou sous forme algébrique pour le flux de chaleur :

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

Avec :

Φ : Flux de chaleur transmis par conduction [W/m²]

T : Température [°C].

λ : Conductivité thermique [W/m°C].

S : Air de la section traversée par le flux de chaleur [m²].

Le signe moins (-) de la relation de Fourier traduit le fait que l'échange de la chaleur se fait du corps chaud vers le corps froid. On peut considérer, avec une précision suffisante, λ comme une constante pour un milieu donné. [8]

II.2.1.1 La conductivité thermique

La conductivité thermique λ est une propriété physico-chimique de la matière et donc suivant les valeurs de ce coefficient, les corps sont classés comme des conducteurs ou des isolants thermiques (solide, liquide et gaz). Son ordre de grandeur diffère selon l'état de la matière et dépend fortement de la température dans le cas des corps gazeux. Cette dépendance est généralement linéaire pour les corps solides aux températures ordinaires. On peut même considérer que cette conductivité est constante dans des gammes de température relativement réduites, ce qui est le cas pour les machines électriques. [8] [9]

Le principe de la conduction repose sur la loi de Fourier qui stipule que le vecteur densité de flux thermique est proportionnel à l'opposé du gradient (local) de la température T suivant la normale aux surfaces isothermes. Cette loi s'écrit à l'équilibre thermique comme suit :

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (\text{II.3})$$

II.2.1.2 La conductivité thermique des solides hétérogènes (notion de la résistance thermique)

Dans le cas des matériaux solides composés hétérogènes, très répandus dans la construction des machines électriques, contrairement au cas des solides purs, une conductivité thermique équivalente peut être définie lorsque leur structure est régulière (Paquet de tôles isolées). Pour cela on utilise la notion de résistance thermique qui est analogue en électrocinétique à la résistance électrique. [10]

Chapitre II: Modes de transfert de chaleur et méthodes d'étude thermique.

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

Dans la Figure suivante, pour T_1 et T_2 , la chaleur s'écoule de la surface (S_1) vers la surface (S_2).

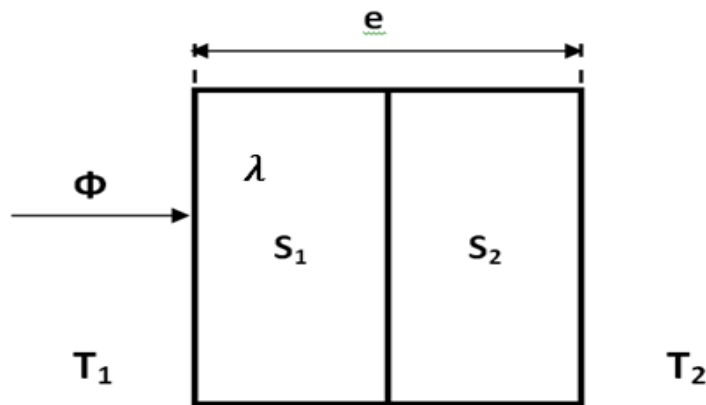


Fig II.1 Transmission de chaleur par conduction.

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

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

Avec :

Φ : Flux d'énergie transmise.

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

e : Distance entre deux surfaces dont la température est T_1 et T_2 .

λ : Conductivité thermique.

D'où :

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

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

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

Chapitre II: Modes de transfert de chaleur et méthodes d'étude thermique.

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

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

- Cas d'un cylindre :

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

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

- Cas d'une sphère :

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

Avec:

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:

✓ Association parallèle

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

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

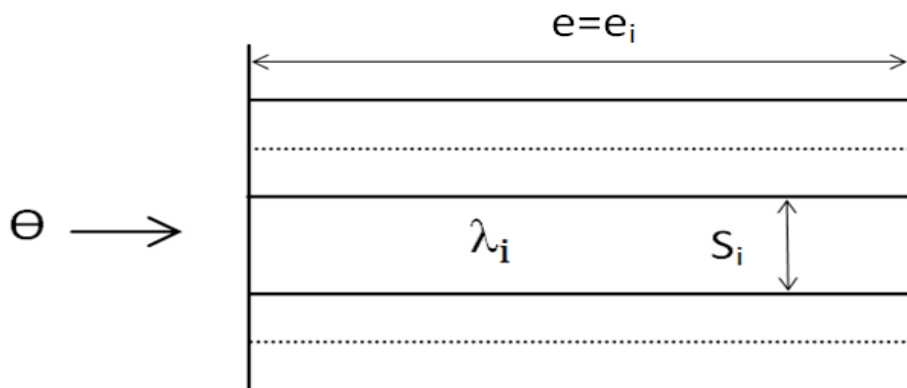


Fig. II.2: Association parallèle.

✓ Association série

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

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

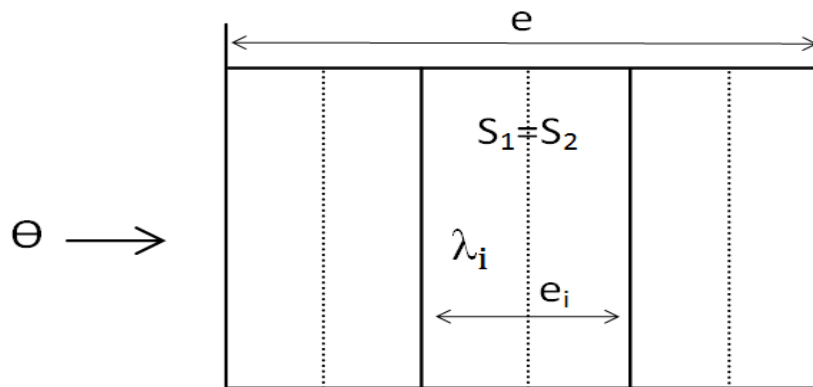


Fig II.3 Association série

II.2.1.3. Résistance thermique de contact

Le comportement thermique à l'interface entre deux éléments différents est complexe. Lorsque deux solides sont en contact, du fait de leurs rugosités, le contact ne s'effectue jamais sur toute la surface apparente.

Entre les zones du contact subsiste un espace interstitiel, en général mauvais conducteur, qui constitue un frein au transfert de chaleur. Le champ de température se trouve donc considérablement perturbé dans la région localisée. Il en résulte une constriction des lignes de flux dont dépend la résistance thermique de contact. Celle-ci dépend des propriétés physiques des solides en contact, de l'état des surfaces et de la pression du contact. Donc tout se passe comme s'il y avait une conductance thermique de contact introduisant une brusque discontinuité de température sur une très faible distance, au passage de l'interface. Pour les machines électriques, des techniques de modélisation qui tiennent compte de contacts imparfaits et une brève représentation de ces méthodes est décrite par la suite. [8]

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

$$R_{ct} = \frac{e}{\lambda S} = \frac{1}{h_{ct} * S} \quad \text{(II.12)}$$

Avec :

R_{ct} : Résistance de contact en [°C/W].

$h_{ct} = \lambda/e$: est le coefficient de contact [W/m² °C].

S : la surface de contact en [m²].

e : très faible épaisseur de contact en [m].

II.2.2 Transfert de chaleur par convection

Il s'agit d'un transport de chaleur dû au mouvement d'un fluide de température moyenne T_m au contact d'un solide de température T_s . En effet le mouvement des particules transfère l'énergie par mélange. Il n'a lieu que dans les fluides, où l'existence d'une répartition de température non uniforme modifie localement la masse volumique et entraîne des écoulements de fluide sous l'action du champ des forces de pesanteur. [8] [24]

- **Convection Naturelle**

Le mouvement peut être provoqué par l'existence même du transfert de chaleur par suite de l'apparition dans le milieu d'une différence de masse volumique qui peuvent être générées par des gradients de température (l'air chaud est plus léger que l'air froid) donc le transfert de chaleur est dit « naturelle ». [16] [26]

- **Convection Forcée**

Le transfert de chaleur par convection apparaît entre deux phases dont l'une au moins est mobile, en présence d'une différence de température, le mouvement des phases peut être provoqué par une dégradation d'énergie mécanique, le transfert de chaleur est dit « forcée » le mouvement du fluide est provoqué par des actions mécaniques extérieures (pompe, ventilateur...). [16] [26]

On parlera de convection mixte lorsque les deux types de convection coexistent dans un système. Dans la plupart des cas, le transfert de chaleur par convection forcée, est le mode de transfert de chaleur essentiel, pour de nombreux appareils industriels de transfert de l'énergie thermique.

II.2.3 Transfert de chaleur par rayonnement

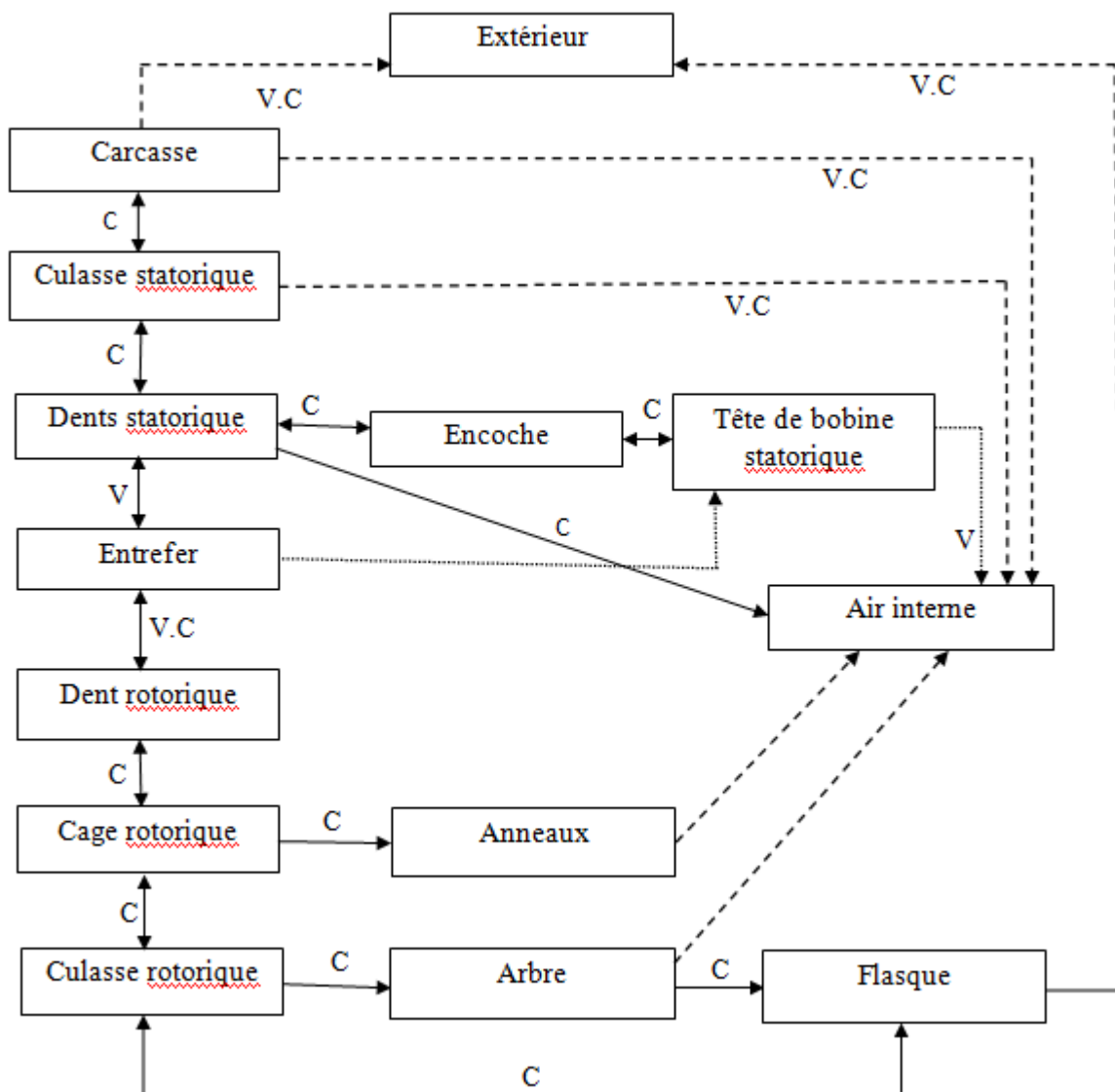
La plupart des corps matériels solides, liquides ou gazeux, portés à une température supérieure à 0 K émettent un rayonnement électromagnétique, lorsque ce dernier est absorbé, il est transformé en énergie thermique. Tout corps qui émet ce type de rayonnement est capable d'absorber un rayonnement de même nature, ainsi il apparaîtra entre deux corps capables d'émettre ce type de rayonnement, un échange de chaleur dit par rayonnement. Ce type d'échange existe même lorsque les deux corps sont à la même température mais dans ce cas le débit de chaleur échangé est nul (Les deux corps sont dits en équilibre thermique).

Le débit de chaleur croît au fur et à mesure que la différence de température entre les deux milieux augmentent mais il dépend aussi du niveau des températures. On peut dire dès à présent que les échanges par rayonnement augmentent et deviennent prédominants aux températures élevées.

II.3 Échange thermique dans une machine électrique

Pour la détermination des différents modes de transfert de chaleur internes associés aux différentes parties de la machine étudiée, nous amène à la décomposé en blocs. Les blocs sont définis par la nature des matériaux ou une équivalence et/ou des modes d'échanges thermiques. L'analyse de ces échanges conduit à installer entre les nœuds (centres des blocs) des connexions appelées conducteurs thermiques. [11]

La figure (II.4), représente ces différents blocs et les modes de transfert de chaleur entre eux.



C : conduction

V : convection

R : rayonnement

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

Pour certains de ces blocs où sont localisées les pertes constituent des sources de chaleur et qui sont présentés sur la figure II.5 suivante

➤ Les différentes sources de chaleur d'une machine asynchrone

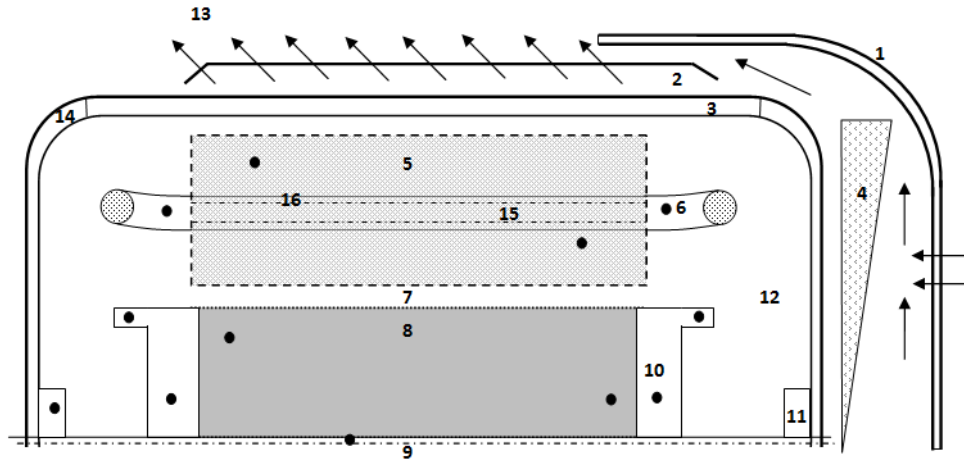


Fig. II.5: Source de chaleur d'une machine asynchrone.

- Source de chaleur
- Circulation de l'air

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

II.4 Méthodes d'étude thermique

Les principales méthodes utilisées pour traiter et modéliser les phénomènes thermiques dans une machine électrique sont présentés dans ce qui suit :

II.4.1 Méthode expérimentale

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

Plusieurs approches ont adopté cette méthode utilisant les différents appareils et capteurs de mesure selon l'utilité et les conditions de fonctionnement

II.4.1.1 Méthode calorimétrique

Cette méthode permet de déterminer les pertes d'une machine électrique. Elle consiste en une infrastructure lourde, car il faut mettre cette machine dans une enceinte isolée et mesurer l'énergie calorifique fournis par le système de refroidissement.

Le schéma d'une telle réalisation est représenté sur la Fig. (II.6) :

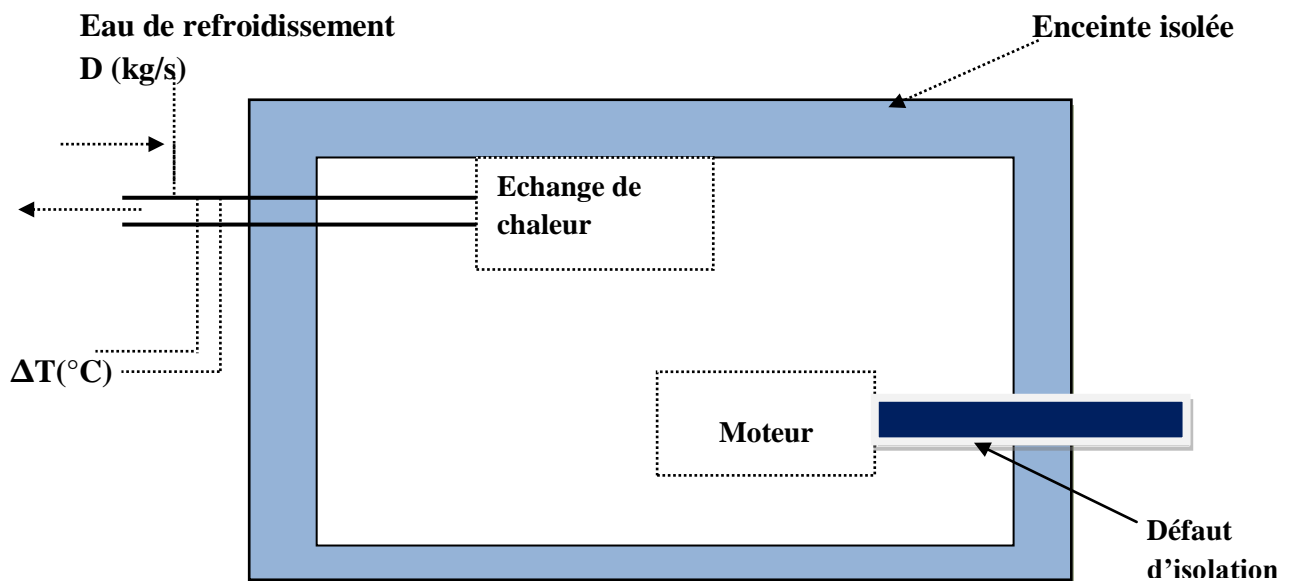


Fig. II.6 Dispositif de mesure calorimétrique.

II.4.2 Méthodes théoriques

II.4.2.1 Méthode empirique

Nous retrouverons ces méthodes dans les ouvrages de construction des machines. Ces méthodes permettent d'évaluer la température au point de fonctionnement nominal au régime permanent. Cette estimation est très délicate au vu de nombre important des paramètres qui interviennent. Elles consistent en la résolution analytique de l'équation de la chaleur, qui ne peut être effectuée que pour des géométries simples et pour un point de fonctionnement nominal en régime permanent, avec des alimentations classiques (Sinusoïdale ou parfaitement continu). [12]

II.4.2.2 Méthode nodale

La méthode nodale consiste à ramener l'étude du comportement thermique à un schéma équivalent électrique, en utilisant des résistances et des capacités thermique. Les pertes constituant alors la source de courant et le potentiel aux nœuds donne la température (Voir tableau II.1). La machine est considérée comme un assemblage de pièces homogènes dans sa construction et son fonctionnement.

Tab II.1 Analogie thermoélectrique.

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

L'utilisation de ces méthodes impose la définition d'un paramètre commun dans les régions solide et fluide. La description des grandes étapes de la réalisation de cette modélisation est la suivante. Découpage de la machine en bloc élémentaire (bobinage statorique, fer statorique et fer rotorique). Une autre approximation, plus performante divise la machine en cinq parties comme présenté par la Figure II.7, chaque élément étant identifié par un nœud dans le réseau thermique avec sa capacité thermique et la source de chaleur correspondante.

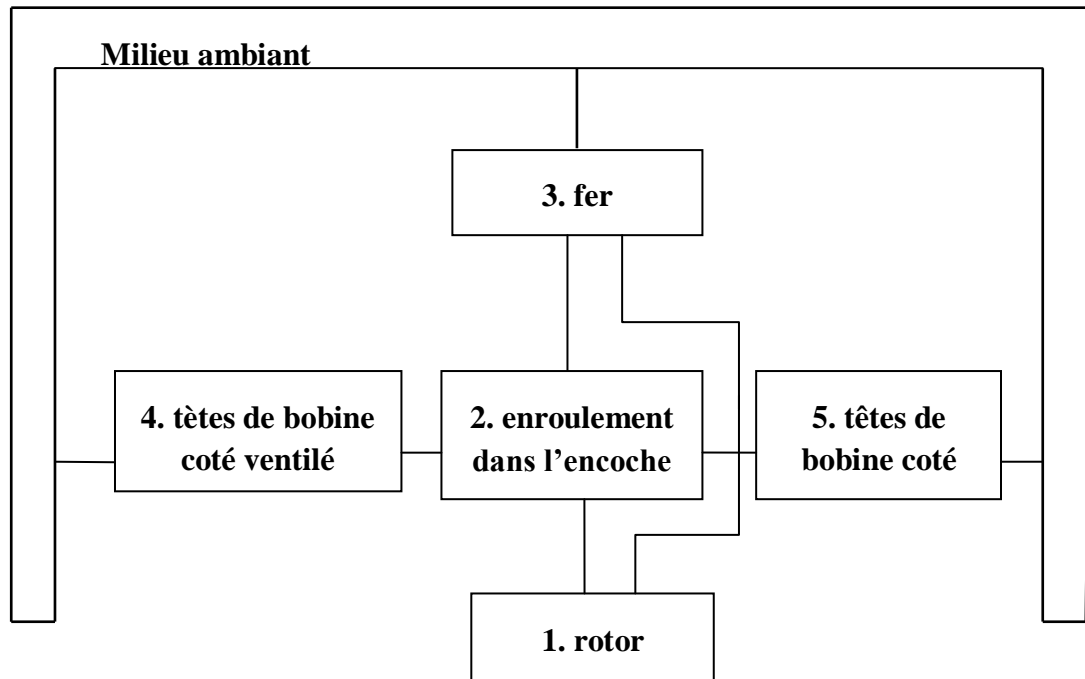


Fig II.7: Découpage en cinq corps du moteur à induction.

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

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

Où :

G : La matrice des conductances thermiques.

θ : Le vecteur de températures inconnues.

P : Le vecteur des pertes.

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

$$C_i \cdot \frac{d\theta_i}{dt} = \sum_{j=1}^n G_{ji} (\theta_j - \theta_i) + P_i \quad \text{(II.14)}$$

Avec :

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

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

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

P_i : Chaleur générée dans le bloc i [W].

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

ρ_i : La masse volumique (kg /m³).

v_i : Volume élémentaire du nœud i (m³).

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

Les difficultés liées à cette méthode sont:

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

II.4.2.3 Méthode numérique

Les méthodes de résolution numériques, présentent de plus grands avantages, ces méthodes sont basées sur un découpage (discrétisation) plus au moins fin du système modélisé et permettant de tenir compte de plusieurs paramètres (non linéarité, géométrie complexe) qu'on ne peut généralement pas considérer avec les méthodes analytique, et les méthodes les plus utilisées dans le domaine de la thermique sont : la méthode des différences finies et la méthode des éléments finis.

1. Méthode des différences finies

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.

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

La méthode des éléments finis permet donc de résoudre de manière discrète une équation aux dérivées partielles dont on cherche une solution approchée « suffisamment » fiable. De manière générale, cette équation aux dérivées partielles (EDP) porte sur une fonction, définie sur un domaine. Elle comporte des conditions aux bords permettant d'assurer l'existence et l'unicité d'une solution.

Sauf cas particuliers, la discrétisation passe par une redéfinition et une approximation de la géométrie, on considère donc le problème posé sur la géométrie approchée par un domaine polygonal ou polyédrique par morceaux. Une fois la géométrie approchée, il faut choisir un espace d'approximation de la solution du problème. Dans la MEF, cet espace est défini à l'aide du maillage du domaine (ce qui explique aussi pourquoi il est nécessaire d'approcher la géométrie). Le maillage du domaine permet d'en définir un pavage dont les pavés sont les éléments finis. Un élément fini est la donnée d'une cellule élémentaire et de fonctions de base de l'espace d'approximation dont le support est l'élément, et définies de manière à être interpolée.

La solution trouvée, il reste cependant à déterminer les caractéristiques de la méthode ainsi développée, notamment l'unicité de l'éventuelle solution ou encore la stabilité numérique du schéma de résolution. Il est essentiel de trouver une estimation juste de l'erreur liée à la discrétisation et montrer que la méthode ainsi écrite converge, c'est-à-dire que l'erreur tend vers zéro si la finesse du maillage aussi tend vers zéro.

II.5 Étude de la machine asynchrone à cage en utilisant le logiciel FEMM

II.5.1 Présentation de la FEMM (Finit Elements Method Magnetics)

Le logiciel FEMM comporte une série de programme permettant de résoudre des problèmes d'électromagnétiques à basses fréquences dans des domaines plans (2D) et axisymétriques bidimensionnels, ce logiciel se comporte de trois programmes essentiels qui sont :

- 1. Femm.exe:** Est un poste préprocesseur contenant une interface graphique qui permet de fixer la géométrie de l'objectif étudié, les propriétés matérielles ainsi leur condition aux limites, après l'analyse la solution est affichée sous forme de contour, densité de flux....etc. Le logiciel permet également d'évaluer un certain nombre d'intégrales et de tracer diverses quantités d'intérêt le long du contour défini par l'utilisateur.
- 2. Triangle.exe:** C'est un programme qui décompose les régions étudiées en un nombre finis d'éléments sous forme triangulaire, ce qui constitue une étape très importante de l'analyse par la méthode des éléments finis.
- 3. Fkern.exe:** Est un espace dans lequel se résolvent les équations aux dérivées partielles pour obtenir les valeurs de champ magnétique dans le domaine étudié.

La méthode des éléments finis peut être programmée en utilisant des logiciels comme MATLAB, Maple ou Fortran. La programmation de la méthode nécessitera un temps

considérable au détriment de son exploitation dans la conception des machines asynchrones à cage d'écureuil.

Pour cela, les calculs dans ce mémoire, sont effectués à l'aide d'un logiciel 2D basé sur la méthode des éléments finis désigné par FEMM.

II.5.2 Utilisation du logiciel FEMM

Les étapes à suivre pour un bon usage de la FEMM dans l'analyse des machines électriques sont :

II.5.2.1 Définition du problème

La toute première étape est la définition du problème qui comprend les quatre éléments importants suivants:

- 1. Type :** Définir le type de problème à traiter (planaire, asymétrique).
- 2. Unité :** Définir l'unité utilisée dans l'étude (millimètre, mètre ...etc).
- 3. Fréquence:** Elle vaut 0 si le problème est magnétostatique.
- 4. Profondeur:** La longueur de la machine a étudié.

II.5.2.2 Condition aux limites

Lors de la réalisation d'une simulation numérique, il est nécessaire d'imposer des conditions aux limites afin de délimiter le problème. Afin de minimiser le domaine d'étude et donc le temps de calcul.

- **Condition de type Dirichlet:** Cette condition assigne la valeur du vecteur potentiel A_z à travers une limite géométrique (segment, arc, etc). Cette condition nous renseigne sur les lignes de tangentielle limité le domaine étudié de la machine.
- **Condition de type Neumann:** Cette condition nous renseigne sur les lignes de flux qui sont normales aux limites de la machine.

II.5.3 Présentation de la structure étudiée

La machine concernée est la machine asynchrone à cage d'écureuil triphasé de puissance 2,2 KW, ses données géométriques sont résumées dans l'Annexe A. Elle possède

deux paires de pôles. La coupe transversale de la Figure II.8 montre les différentes parties de la machine. Celle-ci est constituée de:

- Un stator cylindrique en tôles magnétiques à 36 encoches, comportant un enroulement triphasé à une seule couche à bobines concentriques.
- Un rotor en tôles magnétiques composé de 28 barres en aluminium

1. Tracer de l'arbre

Placer les nœuds (0,18.5) ;(0,-18.5). Se mettre sur mode Arc puis tracer un Arc de droite à gauche avec un « Arc angle » 180 et « Max. Segment degrés » 1.

2. Tracer de l'encoche du rotor :

Placer les nœuds (-0.5, 44), (-0.5, 43). Se mettre sur mode segment est relié les nœuds entre eux. Placer les (-0.5, 43), (-2.21, 40.75) Se mettre sur mode Arc puis tracer un Arc de droite à gauche avec un <<Arc angle >>12.857 et <<Max. Segment degrees>> 1. Placer les nœuds (-2.21, 40.75), (-0.9, 29.78) se mettre sur mode segment est relié les nœuds entre eux. Sélectionner les segments et les Arcs un par un de droite et activer la barre d'espacement, dans la case <<In group>>, remplacer 0 par 1. Activer l'icône de groupe et sélectionner le groupe. Pour créer l'encoche complète, on utilise la fonction <<Mirror>> on place les coordonnées (0,0.9) pour <<first point on line >> et (0,2.21) dans <<second point on line>>, puis relier les deux nœuds du haut de l'encoche à l'aide d'un Arc avec un <<Arc angle >> 180 et <<Max. Segment degrees>> 1. Sélectionner l'Arc et activer la barre d'espacement, dans la case <<In group>>, remplacer 0 par 1. Sélectionner le groupe et effectuer une copie, en mettant dans copy- <<Angular shift, degrés>> 12.875 et <<number of copies>> 27.

3. Tracer de l'encoche du stator :

Placer les nœuds (-1.4, 44.25), (-1.4, 45.25), (-2,45.25), (-3.08, 56.68). Se mettre sur mode segment est relié les nœuds entre eux. Sélectionner les segments un par un de droite et activer la barre d'espacement, dans la case « In group », remplacer 0 par 1. Activer l'icône de groupe et sélectionner le groupe. Pour créer l'encoche complète, on utilise la fonction « Mirror » on place les coordonnées (0,1.4) pour « first point on line » et (0,3.08) dans « second point on line », puis relier les deux nœuds du haut de l'encoche à l'aide d'un Arc avec un « Arc angle »180 et « Max. Segment degrees » 1. Sélectionner l'Arc et activer la barre d'espacement, dans la case « In group », remplacer 0 par 1.

Sélectionner le groupe et effectuer une copie, en mettant dans copy « Angular shift, degrees » 10 et « number of copies » 35.

4. Tracer de la machine asynchrone à cage d'écureuil complète

Placer les nœuds (0,72.5) ;(0,-72.5).Se mettre sur mode Arc puis tracer un Arc de droite à gauche avec un « Arc angle » 180 et « Max. Segment degree ».

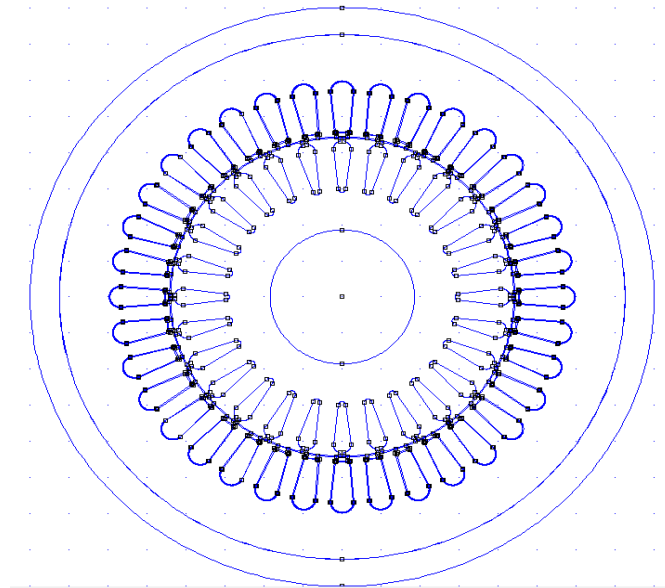


Fig. II.8 Géométrie complète de la machine.

- **Matériaux:** Les matériaux des objets qui forment la structure doivent être définis, ils peuvent être choisis parmi la bibliothèque de matériaux intégrée dans le logiciel (FEMM), comme ils peuvent être de nouveaux matériaux ajoutés préalablement définis pour cette analyse.

Une étiquette est définie pour chaque objet constituant la machine, puis le matériau approprié est assigné à l'objet, exemple, le cuivre est assigné aux enroulements du stator, l'aluminium est assigné aux barres du rotor et l'air est assigné à l'espace entre fer.

II.5.4 Évaluation des paramètres thermo physique

Dans notre simulation avec FEMM de la répartition de la température dans la machine étudiée nécessite la connaissance des paramètres thermo physique : conductivités thermique et densités de pertes générées (voir annexe B), elles sont présentées dans le tableau II.4 page 34.

II.5.4.1 Détermination des pertes fer et des pertes mécaniques

Elles peuvent être déterminées expérimentalement en utilisant une série de tests à vide à fréquence nominale et à des tensions différentes.

À vide, la puissance absorbée diminuée des pertes par effet Joule dans l'enroulement statorique donne le total des pertes fer et des pertes mécaniques qui sont alors calculées par la méthode de séparation des pertes constantes en fonction de la variation de la tension d'alimentation et à vitesse de rotation sensiblement constante.

• Schéma de montage

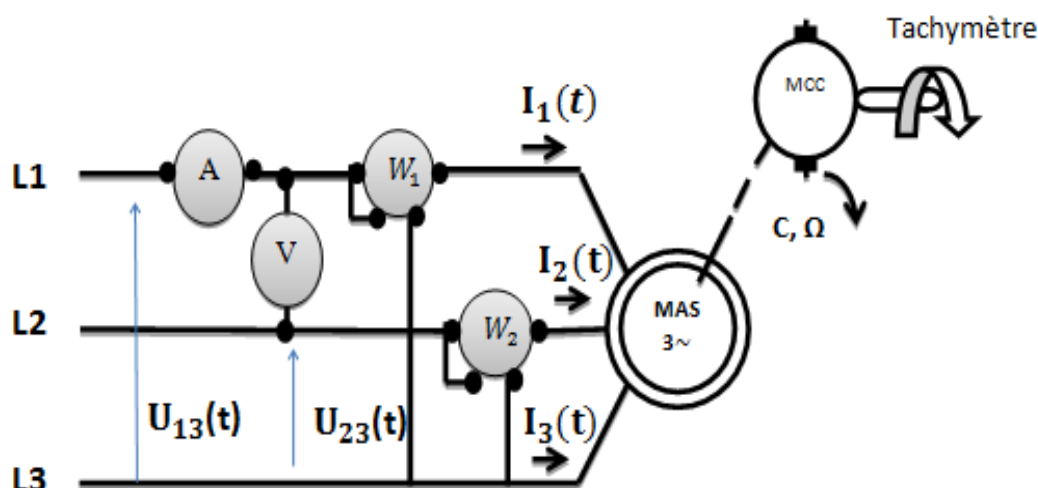


Fig. II.9 Circuit de mesure de l'essai à vide

La puissance électrique absorbée à vide P_0 correspond à la somme des pertes : les pertes dans le fer du stator P_{fs} , les pertes par effet joule dans le stator P_s et les pertes mécaniques P_m .

$$P_0 = 3R_s I_{s0}^2 + P_{fs} + P_m \quad \text{(II.16)}$$

$$P_0 - 3R_s I_{s0}^2 = P_{fs} + P_m \quad \text{(II.17)}$$

La méthode de séparation des pertes consiste à alimenter la machine à vide progressivement de zéro jusqu'à sa valeur nominale, puis faire diminuer la tension petit à petit en relevant la puissance et le courant à vide P_0 et I_{s0} à condition que la vitesse reste constante. Nous avons obtenu les valeurs suivantes :

Tab II.2 Indications des appareils de mesure dans l'essai à vide.

Tension (V)	I_0 (A)	P_{w1} (KW)	P_{w2} (KW)	P_0 (KW)	T ($^{\circ}C$)	N (tr/min)
380	2.90	0.65	-0.39	0.26	37.50	1496
370	2.71	0.64	-0.38	0.22	37.60	1496
360	2.50	0.56	-0.34	0.22	37.80	1496
350	2.32	0.51	-0.30	0.20	38.00	1496
340	2.20	0.46	-0.26	0.20	38.40	1496
330	2.05	0.41	-0.23	0.17	38.50	1496

Chapitre II: Modes de transfert de chaleur et méthodes d'étude thermique.

320	1.90	0.38	-0.21	0.17	38.80	1495
310	1.80	0.36	-0.19	0.16	39.10	1495
300	1.70	0.33	-0.18	0.15	39.40	1495
290	1.60	0.30	-0.16	0.14	40.00	1495
280	1.51	0.28	-0.14	0.14	40.40	1495
270	1.49	0.26	-0.12	0.14	40.60	1495
260	1.41	0.24	-0.11	0.12	40.90	1495
250	1.35	0.22	-0.10	0.12	40.90	1495
240	1.31	0.21	-0.09	0.11	40.90	1495
230	1.26	0.20	-0.08	0.12	41.20	1494
220	1.19	0.18	-0.07	0.11	41.50	1494
210	1.12	0.16	-0.06	0.10	41.55	1493
200	1.08	0.15	-0.05	0.10	41.60	1493
180	0.90	0.12	-0.04	0.08	41.90	1493
160	0.78	0.10	-0.02	0.08	42.30	1491
140	0.75	0.08	-0.01	0.07	43.40	1490
120	0.72	0.06	0.00	0.06	44.20	1486
100	0.66	0.05	0.00	0.05	44.80	1481
80	0.62	0.04	0.00	0.04	45.50	1470
60	0.68	0.03	0.01	0.02	46.00	1446
40	1.10	0.03	0.01	0.02	47.70	1342
20	1.40	0.02	0.00	0.02	41.90	00
10	0.65	0.00	0.00	0.00	41.00	00

D'après le Tableau, on remarque que si la tension d'alimentation est supérieure à 240 V la vitesse de rotation de la machine est constante et si cette tension est inférieure à 240 V la vitesse de rotation de la machine diminue même la machine s'arrête de tourner une fois que la tension est inférieure à 20 V, la machine devient impuissante de développer le couple nécessaire.

Alors pour l'étude de la machine, on s'intéresse à la partie où la vitesse de rotation est constante.

Nous avons obtenu dans l'essai à vide les valeurs suivantes :

Tab II.3 Calcul préliminaire à partir de l'essai à vide.

V_0 [V]	V_0 [V]	I_{0Y} [A]	R_s [Ω]	P_{js} [W]	P_0 [W]	$P_0 - P_{js}$	N(tr/min)
380	144400	1,67	9,07	75,88	260	184,12	1496
370	136900	1,56	9,07	66,21	225	158,79	1496
360	129600	1,44	9,08	56,48	220	163,52	1496
350	122500	1,33	9,08	48,18	205	156,82	1496
340	115600	1,27	9,10	44,03	200	155,97	1496
330	108900	1,18	9,10	38,01	175	136,99	1496
320	102400	1,09	9,11	32,47	171	138,53	1495
310	96100	1,03	9,12	29,02	165	135,98	1495
300	90000	0,98	9,13	26,30	150	123,7	1495
290	84100	0,92	9,15	23,23	140	116,77	1495
280	78400	0,87	9,16	20,79	140	119,21	1495
270	72900	0,86	9,17	20,34	140	119,66	1495
260	67600	0,81	9,18	18,06	125	106,95	1495
250	62500	0,77	9,18	16,32	120	103,68	1495
240	57600	0,75	9,18	15,49	115	99,51	1495

• **Le graphe des pertes mécanique et pertes fer statorique en fonction de la tension (V)**

La figure montre l'évolution des pertes mécanique et pertes fer statorique, en fonction de la tension d'alimentation de la machine.

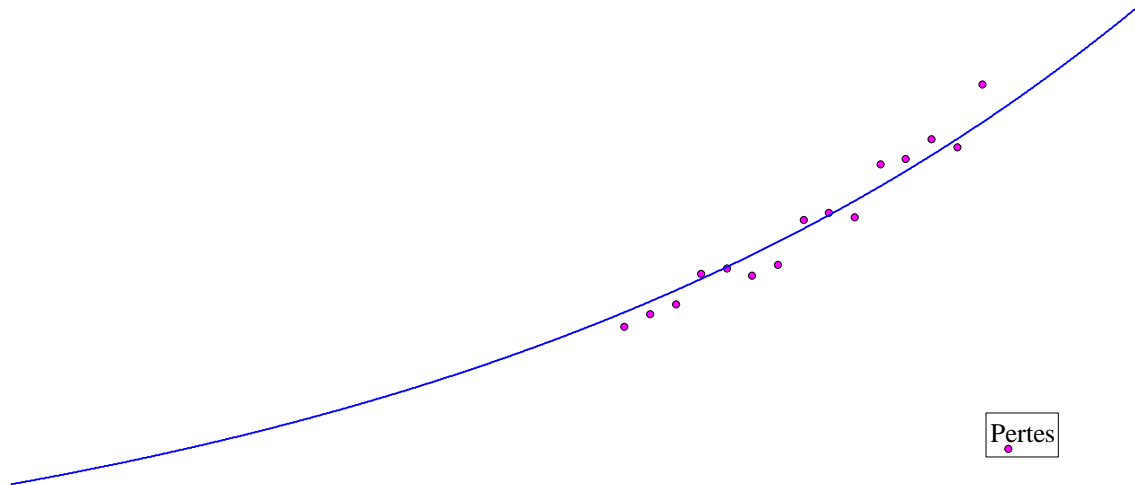


Fig II.10 Courbe des pertes fer et mécanique en fonction de la tension.

D'après la Figure II.10 on remarque que, à chaque fois on augmente la tension d'alimentation les pertes mécanique et les pertes fer augmentent.

- **Le graphe des pertes mécanique et pertes fer statorique en fonction au carré de la tension (V^2)**

Les pertes mécaniques au rotor, elles sont proportionnelles au carré de la tension à une vitesse de rotation constante, soit l'équation suivante :

$$P_0 - 3R_s I_{s0}^2 = f(V^2) \quad \text{(II.18)}$$

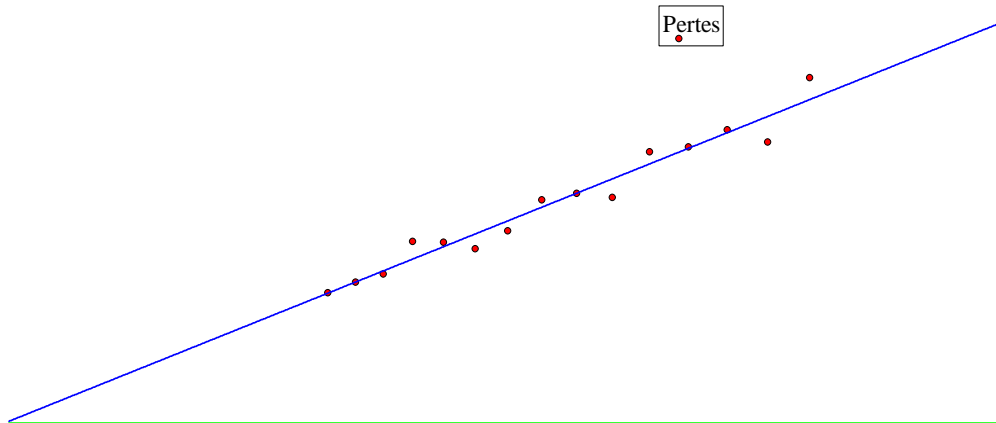


Fig. II.11 Courbe des pertes fer et mécanique en fonction du carré de la tension.

En traçant la courbe de la puissance consommée par la machine diminuée des pertes par effet Joule en fonction du carré de la tension d'alimentation (équation II.18), on obtient une droite. Le prolongement de cette droite jusqu'à la tension ($V=0$) donne les pertes mécaniques constantes par rapport à la tension d'alimentation.

Résultats de calcul de l'essai à vide

$$\text{Pertes mécanique} = 48 \text{ [W]}$$

$$\text{Pertes fer} = 132,12 \text{ [W]}$$

II.5.4.2 Propriétés physiques des matériaux solides

Les propriétés physiques des matériaux solides intervenant dans la construction des machines électriques sont les suivantes:

- Résistivité électrique pour les matériaux :

$$\text{Fer} = 9,71 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$$

$$\text{Cuivre} = 1,724 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$$

$$\text{Aluminium} = 2,655 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$$

Tab II.4 Conductivité thermique et densité des pertes de la machine et en charge

Régions	Conductivité thermique W/m°C	Densité volumique des pertes en charge W/m ³
Carcasse	57	0
Interface	56.10^{-3}	0
Fer stator	50	310770
Fer rotor	50	0
Cuivre	80.10^{-2}	805500
Aluminium	237	493590
Entrefer	25.10^{-3}	0
Acier	50	0
Isolant	100.10^{-3}	0

II.5.5 Le maillage

II.5.5.1 Définition

Le maillage est une opération qui consiste à définir un domaine quelconque, puis à le subdiviser en plusieurs sous domaine de forme polygonale simple appelés éléments, ces domaines sont repérés par les coordonnées de leur sommets qu'on appelle nœud.

II.5.5.2 Construction du maillage

La phase de maillage est sans doute celle où on passe le plus de temps dans la définition d'un problème, le maillage ne doit pas être inutilement fin, puisque le calcul est coûteux, donc on doit chercher un compromis entre la finesse de la représentation géométrique et le coût de calcul.

Quand on a le résultat final on peut décider de mailler grossièrement dans certaines régions comme le dos du stator et le rotor et dans d'autres parties du moteur, avec le logiciel FEMM l'opération du maillage est très simple car elle se fait automatiquement, après avoir enregistré la structure qu'on a déjà construit dans la partie préprocesseur, on exécute le

programme auxiliaire de triangulation (triangle.exe). Pour faire le maillage de la machine, on clique sur l'icône <<maillage>>.

Les résultats obtenus du maillage 309388 nœuds, 618414 éléments et une précision de 10^{-8} Voir la Fig II.12 :

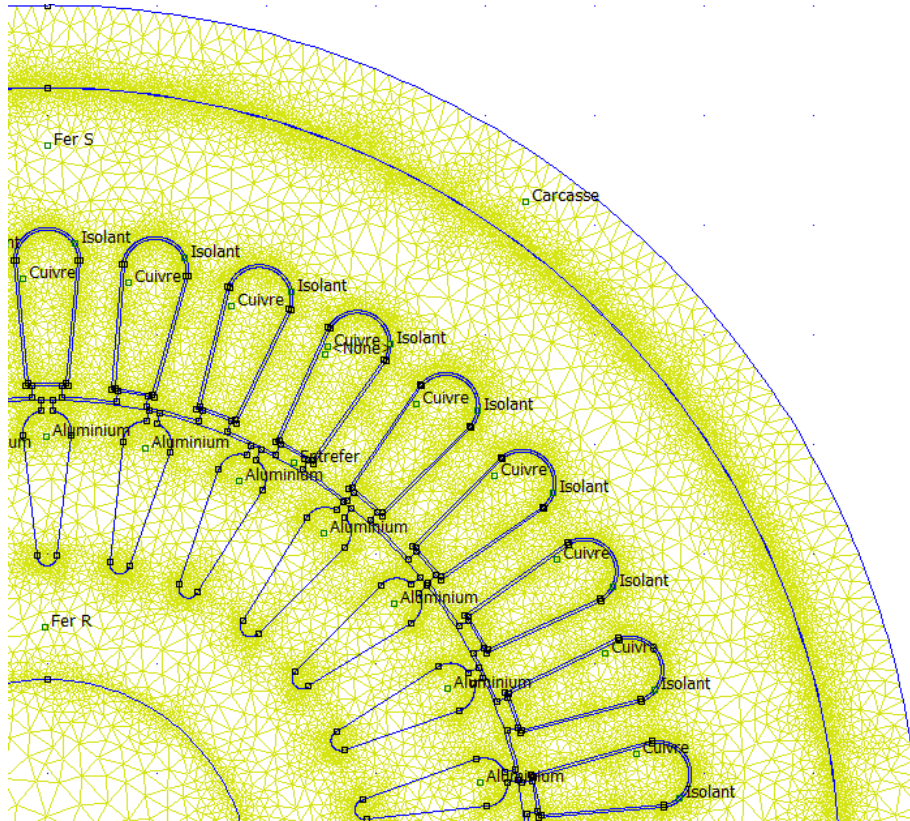


Fig II.12 Maillage élément finis de la machine.

II.5.6 Étude de la distribution de la température dans les différentes régions

- **Les résultats de la simulation sous FEMM :**

Après avoir imposé la température de la carcasse, relevé expérimental, comme condition aux limites de la méthode des éléments finis on obtient la répartition de température dans les différentes régions de la machine représentée

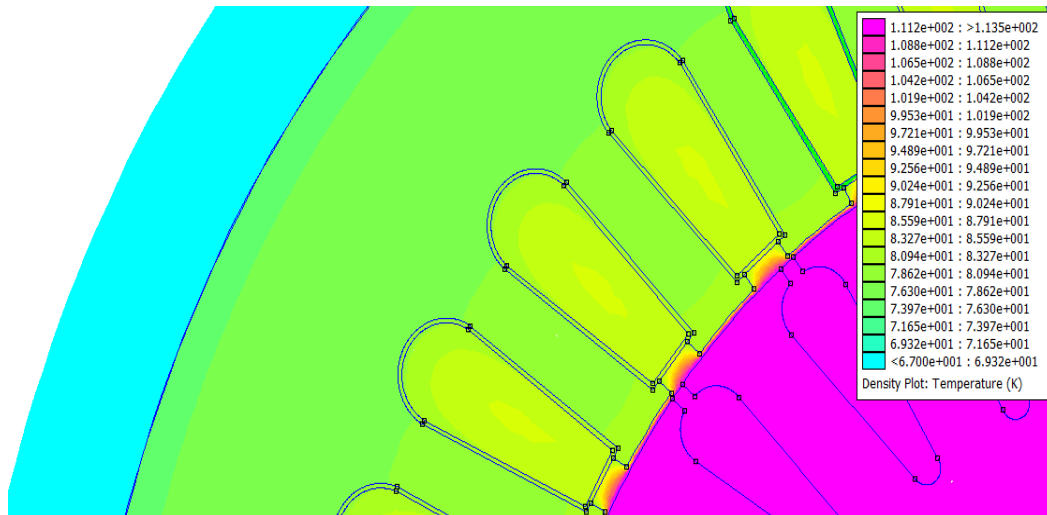


Fig. II.13 Représentation de la Répartition de la température dans le moteur en charge.

L'étude de la répartition de la température pour chaque région séparément, nous donne les résultats des figures II.13. Nous constatons que la température n'est pas importante au niveau du stator et du rotor, mais aussi la température est très élevée uniquement au niveau des bobines, ceci est dû aux pertes joule qui sont plus importantes que les pertes fer, et aux coefficients de refroidissement qui sont importants dans l'entrefer.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons expliqué les différents modes de transfert de chaleur dans une machine électrique, puis nous avons représenté les différentes sources de chaleur et la circulation de l'air. Enfin nous avons présenté la carte des échanges thermiques dans une machine électrique.

Le travail réalisé sur la modélisation thermique a montré que la température dans le bobinage est plus importante que le fer stator et le fer rotor. Ceci est dû aux pertes Joule en charge qui sont plus importantes que les pertes fer. Les résultats trouvés dans ce cas ont montré une conduction de la chaleur vers le stator. Les régions du bobinage où la convection est faible et en grande partie vers les têtes de bobines. La structure est composée de cuivre, d'aluminium, d'interface, d'acier et d'isolant ce qui complique la détermination exacte de la distribution de la chaleur.

Chapitre III

Moyens de mesure de température

III.1 Introduction

Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services, loisirs ...), on a besoin de contrôler de nombreux paramètres physiques (température, force, position, vitesse, luminosité...etc). Le capteur est l'élément indispensable à la mesure de ces grandeurs physiques, et même est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (très souvent électrique). Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande.

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. [17]

III.2 Les différentes méthodes de mesure

Pour mesurer la température dans des endroits différents d'une machine électrique en plein fonctionnement, on fait appel à trois méthodes différentes:

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

III.2.1 Méthode de mesure 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 contact direct, entre l'élément sensible et le capteur. [18]

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

III.2.2 Méthode de mesure 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.2.3 Méthode de mesure mixte

C'est un moyen de mesure qui est utilisé dans plusieurs travaux de recherche, il est basé sur les deux méthodes précédentes.

III.3 Les capteurs de température

Quel que soit le moyen utilisé, la mesure de la température d'un corps résulte d'une action indirecte consistant à traduire l'état d'une grandeur physique intermédiaire influencée par le corps: Évaluation de la dilatation d'un liquide, d'un solide, d'un flux de rayonnement, variation de résistance électrique en valeur chiffrée et exprimée en degrés Celsius ou en Kelvin.

III.3.1 Choix du capteur de mesure de température

Il est difficile de dresser une liste complète de tous les capteurs disponibles et de toutes les configurations. Le choix peut se faire selon la technologie disponible, selon le besoin, soit selon les éléments positifs ou négatifs à prendre en compte.

III.3.2 Les différentes familles des capteurs

Les capteurs présentent des caractéristiques différentes. Ces différences peuvent se baser sur :

- Leur principe de fonctionnement :
 - Capteurs actifs
 - Capteurs passifs
- Leur principe de traduction de la mesure:
 - Capteur résistif
 - Capteur à effet Hall

III.3.3 les thermocouples

III.3.3.1 Constitution et principe

Le thermocouple est un capteur de mesure de température sur la base de l'effet thermoélectrique, il est constitué d'un circuit formé de deux conducteurs; A et B de nature différente réunis à l'une de leur extrémité par une soudure qui sera exposée à la température appeler la jonction de mesure T_2 représenté sur la Fig III.1. Les deux autres extrémités reliées à un appareil de mesure de température appelé la jonction de référence ($T_1=T_{ref}$). Lorsque les deux extrémités sont soumises à des températures différentes, une différence de potentiel apparait entre les conducteurs $V_{A/B}^{T_2 T_1}$. La température est donc mesurable connaissons la température de référence. [19]

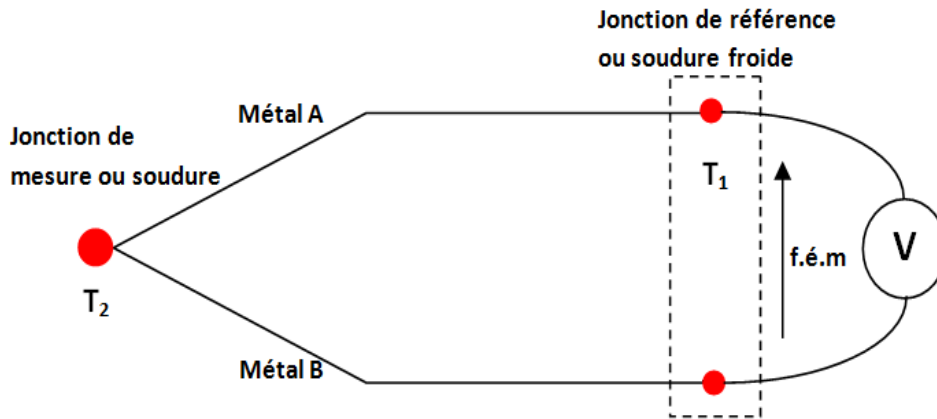


Fig III.1 Constitution d'un circuit thermocouple.

Dans la désignation d'un thermocouple A/B, le métal A est le conducteur positif et le métal B le conducteur négatif. La jonction de mesure est soumise à la température T_2 à mesurer et la jonction de référence, reliant les bornes de l'instrument de mesure, est à une température T_1 connue.

- **L'effet Seebeck:** Décrit la force électromotrice (f.é.m) où Δ est la tension induite par le gradient de température le long du fil. La variation de la f.é.m du matériau par rapport à une variation de température est appelée coefficient de Seebeck ou sensibilité thermoélectrique. Ce coefficient est généralement une fonction non linéaire de la température. [20]

Cependant, pour des petites variations de température sur la longueur d'un conducteur, la tension est à peu près linéaire, c'est donné par l'équation suivante :

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

Où ΔV : Est la variation de tension,

ΔT : La variation de température.

S : Le coefficient de Seebeck.

III.3.3.2 La température de référence d'un thermocouple

Afin de déterminer la température de la soudure chaude, il est nécessaire de connaître la température des soudures froides (Température de référence).

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 jonctions avec les files de liaison. Pour ce qui est de cette dernière,

On peut distinguer trois cas [19] :

- La température de référence est nulle, $T_{\text{ref}} = 0$.
- La température de référence est constante et différente de zéro, $T_{\text{ref}} = C^{\text{ste}}$.
- La température de référence est égale à la température ambiante, $T_{\text{ref}} = T_{\text{amb}}$.

1) Température de référence est nulle, $T_{\text{ref}} = 0$

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

2) Température de référence est constante et différente de 0°C , $T_{\text{ref}} = C^{\text{ste}}$

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

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

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

On en déduit la f.é.m. dont le thermocouple serait le siège si la température de référence était de 0°C .

3) La température de référence est variable $T_{\text{ref}} = T_{\text{amb}}$

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

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

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

III.3.3.3 Différents types de thermocouple

Un thermocouple est créé lorsque deux métaux de natures différentes entrent en contact au niveau de l'une de leurs extrémités et que l'on effectue une mesure au niveau de leur autre extrémité, créant ainsi une faible tension en circuit ouvert qui correspond à une différence de température entre le point de contact et le point de mesure. La tension mesurée depuis le thermocouple est équivalente à la différence entre la tension de Seebeck aux bornes de chaque conducteur.

Il existe plusieurs types de thermocouples, désignés par des lettres capitales indiquant leur composition conformément aux conventions ANSI (American National Standards Institute).

Un thermocouple de type J, par exemple, est constitué d'un conducteur en fer et d'un autre en constantan (Alliage de cuivre et de nickel).

La liste des thermocouples est représentée dans le tableau suivant:

Tab III.1: Composition et lettres désignant les thermocouples normalisés

Type de thermocouple	Conducteur-positif	Conducteur-négatif
B	Platine rhodié à 30%	Platine rhodié à 6%
E	Alliage nickel/chrome	Alliage cuivre/nickel
J	Fer	Alliage cuivre/nickel
K	Alliage nickel/chrome	Alliage nickel/aluminium
N	Alliage nickel/chrome/silicone	Alliage nickel/silicone/magnésium
R	Platine rhodié à 13%	Platine
S	Platine rhodié à 10%	Platine
T	Cuivre	Alliage cuivre/nickel

III.3.3.4 Avantages et inconvénients des thermocouples

• **Avantages**

- Une grande souplesse d'utilisation et non encombrant.
- Robustesse : résistent aux chocs et aux vibrations
- Gamme de température très large : De 0 à 1600 K (1326,85 °C)
- Ne nécessite pas une alimentation.
- Une vitesse de réponse élevée, fiables et précise.
- Faible coût d'achat.

- **Inconvénients**

- Faible amplitude de signal.
- La température de référence doit être connue.
- La non linéarité (Réponse non linéaire).
- La nécessité d'une correction due à la température de la soudure froide.
- Faible sensibilité pour certains types de thermocouples.

III.3.4 Les thermistances

III.3.4.1 Constitution et principe

Une thermistance est un élément de détection de température, réalisée à partir d'un matériau semi-conducteur (Ex : Manganèse Nickel). Ce composant est une résistance dont la valeur chimique varie en fonction de sa température.



Fig III.2 Thermistance.

Il existe deux types de thermistances :

CTN : Coefficient de Température Négative.

CTP : Coefficient de Température Positive.

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

- ✓ Les thermistances CTN ont comme composants principaux le NiO, MnO, Fe₂O₃.
- ✓ 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.

- **Caractéristiques de résistance en fonction de la température :**

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

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

Où :

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

R : Résistance de la thermistance en Ohm.

T : La température en degrés Celsius ou en Kelvin.

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

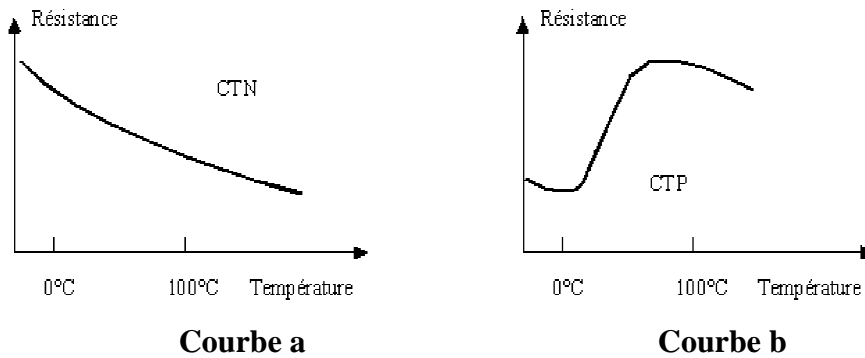


Fig III.3 Caractéristiques typiques des thermistances CTN et CTP.

III.3.4.2 Avantages et inconvénients des thermistances

- **Avantages**

- **Précision:** La thermistance est l'un des types les plus précis des capteurs de température. Les thermistances OMEGA ont une précision de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.
- **Stabilité:** Les éléments de thermistances finis sont chimiquement stables et ne sont pas significativement affectés par le vieillissement.

- **Inconvénients**

- La thermistance est assez limitée dans sa plage de température.
- Non linéarité imposant un étalonnage en plusieurs points.
- Nécessité d'une alimentation et le passage de courant risque de provoquer un échauffement du capteur.

La figure suivante représente les deux types de thermistances:

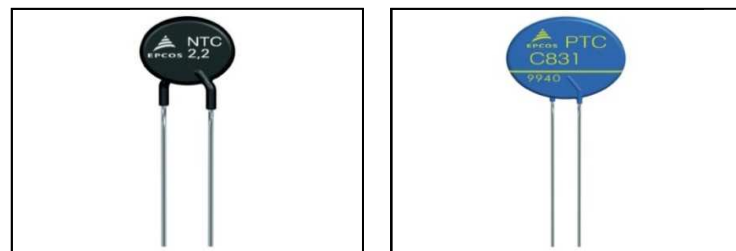


Fig III.4 Les deux types de thermistance.

III.3.5 Comparaison entre les thermocouples et les thermistances

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

Tab III.2 Comparaison des caractéristiques principales des thermistances et des thermocouples.

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

III.3.6 Pyrométrie optique

III.3.6.1 Définition :

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, photoélectrique ou thermique.

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.[19]

La détermination de la température sans contact avec l'objet, c'est une méthode de vaste usage comme :

- Mesure de température élevée (>2000°C), mesures à de grande distance.
- Environnement très agressif.
- Localisation des points chauds.
- Pièce en mouvement.

III.3.6.2 Principe physique

Tout corps émet spontanément et en permanence un rayonnement électromagnétique dont le spectre continu à une répartition énergétique en fonction de la température; c'est le rayonnement thermique. Ce rayonnement à 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 le pouvoir absorbant, se rapproche plus moins de celui du corps noir. [19]

Les images suivantes montrent quelques types de pyromètre infrarouge.



Fig III.5 pyromètre infrarouge.

III.3.7 Caméra thermique

Une caméra thermique (Fig III.6), enregistre différents rayonnements infrarouge (Ondes de chaleur) émis par les corps et qui varient en fonction de leur température. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, une caméra thermique ne permet pas de voir derrière une paroi ou un obstacle. Elle reproduit la chaleur emmagasinée par un corps, ou montre le flux thermique d'une paroi en raison d'un foyer se trouvant à l'arrière. Bien que la longueur d'onde du rayonnement infrarouge dépend de la température, les caméras thermiques ont, en général, un seul canal (Comme une caméra qui filme en "noir et blanc") .Les caméras se contentent de produire une image de l'intensité du rayonnement, qui permet également d'apprécier la température de la source. La couleur produite par la caméra est une fausse couleur, obtenue en associant une couleur à l'intensité reçue, afin de faciliter la lecture directe de la température : à chaque couleur de l'image correspond une température. [22]



Fig III.6 Une caméra thermique.

III.3.7.1 Avantages et inconvénients de la caméra thermique

- **Avantages**

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

- **Inconvénients**

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

III.3.8 Thermomètre

III.3.8.1 Définition

Le thermomètre est un instrument destiné à mesurer la température, dont le but est de déterminer à quel point les objets sont chauds ou froids. Le fonctionnement de celui-ci est basé sur la variation des propriétés physiques (Dilatation thermique, pression...etc.) en fonction du changement de température.

III.3.8.2 Les différentes sortes de thermomètres

Les différentes sortes de thermomètres sont les suivantes: [28]

- Thermomètre à alcool:** Le plus connu des thermomètres est un appareil en verre rempli d'alcool coloré en rouge ou en bleu.

- b) Thermomètre au mercure:** De couleur argentée; le principe du thermomètre à liquide repose sur la dilatation d'un liquide dans un tube de verre gradué. La théorie cinétique émise par Anders Celsius explique aussi le fonctionnement des thermomètres à liquide ordinaires. Le thermomètre est constitué d'une tige de verre munie d'un réservoir à son extrémité et contenant un liquide comme du mercure ou de l'alcool. Quand ce liquide entre en contact avec un élément plus chaud, ceci agite les particules du liquide que contient le thermomètre, ce qui le dilate et fait grimper le mercure, par exemple, le long de l'échelle, à l'intérieur du thermomètre. Lorsque le liquide rencontre un milieu plus froid, l'effet inverse se produit.
- c) Thermomètre à infrarouge:** La technologie d'imagerie numérique nous permet de capter instantanément et sans contact la radiation infrarouge d'une source de chaleur. Cette technique est utilisée, par exemple, dans les satellites et, plus près de nous, dans certains appareils comme les thermomètres médicaux. Il suffit de pointer le faisceau entre 5 et 15 cm du front par exemple pour obtenir la température en moins d'une seconde, en degrés Celsius ou Fahrenheit, au choix. Pratique, notamment pour les nourrissons et enfants en bas âge, il est aussi hygiénique et fiable.

III.3.9 Capteur température LM35

III.3.9.1 Définition

Le LM35 est un capteur à circuit intégré qui peut être utilisé pour mesurer la température avec un signal électrique proportionnel à la température (en °C), et on mesure la température avec plus de précision qu'à l'aide d'une thermistance. Le circuit capteur est scellé et non soumis à l'oxydation, etc. Le LM35 génère une tension de sortie plus élevée que les thermocouples et ne peut exiger que la tension de sortie soit amplifiée. Il a une tension de sortie proportionnelle à la température en Celsius. Le facteur d'échelle est $0.1V/°C$

Le LM35 ne nécessite pas de calibration externe ou de taille et maintient une précision de $+/- 0,4 °C$ à température ambiante et $+/- 0,8 °C$ sur une plage de $0 °C$ à $+100 °C$.

Le capteur a une sensibilité de $10 mV / °C$

$$\text{Température (°C)} * V_{\text{out}} = (100°C / V)$$

Donc, si V_{out} est 1V, puis, la température = $100 °C$ La tension de sortie varie linéairement avec la température.[27]

III.5 Conclusion

Nous avons présentés dans ce chapitre quelques types de capteurs et les différents moyens de mesure de la température, ainsi leurs caractéristiques utilisées pour l'étude thermique expérimentale dans les machines électriques.

D'après les propriétés de la matière qui existe dans les machines électriques et les phénomènes physiques sensibles à la température, nous disposons de deux méthodes de mesure, qui sont la méthode par contact directe et la méthode par contact indirect. Et dans notre cas d'étude on a utilisé la méthode par contact direct on utilisant des thermocouples qui se basent sur la variation thermique sous l'effet thermoélectrique, et des thermistances qui traduisent la variation à une valeur d'une résistance.

Dans le prochain chapitre on va exploiter ces différents moyens de mesure pour réaliser un montage qui nous permet de mesurer la température du moteur à induction.

Chapitre IV

Réalisation d'un dispositif de mesure
de la température rotorique et application

IV.I Introduction :

Ce chapitre sera consacré à la réalisation du dispositif qui nous permettra de mesurer la température au niveau du rotor d'un moteur asynchrone à induction de 2,2 KW, fermé auto-ventilé et cela pour différents régimes de fonctionnement. Pour effectuer cette mesure on va utiliser des capteurs placés sur le rotor et le stator dans des endroits les plus susceptibles d'être des sources de chaleur et accessibles physiquement.

Notre réalisation pratique est faite en deux parties:

- La première partie consiste à une description théorique sur la carte Arduino et la simulation avec PROTEUS.
- La deuxième partie est la réalisation pratique de la maquette, conception de tout le système électronique avec les composants choisis

IV.2 Réalisation du projet

Pour ce projet, l'Arduino et les thermistances fonctionnent ensemble comme un dispositif de détection de température de manière précise et logique pour fournir des relevés de température fiables et précis. Pour illustrer cette relation productive, nous vous proposons un parcours allant du câblage et de la programmation de l'Arduino à l'affichage des résultats de la température au niveau du rotor de la machine asynchrone sur l'écran de l'ordinateur.

➤ Pour ce faire il faut disposer de :

- Une carte Arduino Uno.
- Platine d'expérimentation (Breadboard).
- Ordinateur avec le logiciel Arduino IDE.
- Capteurs de température à thermistance NTC.
- Résistances 47 K Ω .
- Fils électrique souples.

➤ **Présentation de la carte Arduino:**

Arduino est un projet créé par une équipe de développeur composée de six individus, cette équipe a créé le « Système Arduino » qui est une plateforme de prototypage électronique open-source, et aussi un outil qui permet aux débutants, amateurs ou professionnels de créer des systèmes électroniques plus ou moins complexes, ce système nous donne la possibilité d'allier les performances de la programmation avec celle de l'électronique. Les gros avantages de l'électronique programmée c'est qu'elle simplifie grandement les schémas

Chapitre IV: Réalisation du dispositif de mesure de température rotorique et application

électroniques et par conséquent, le coût de la réalisation, mais aussi la charge du travail à la conception d'une carte électronique, voir annexe E.



Fig IV.1 Carte Arduino Uno

➤ Principe de fonctionnement du dispositif

Le principe de fonctionnement est basé sur la constitution d'un pont de diviseur de tension. La méthode la plus simple en électronique pour mesurer facilement une variation de résistance d'un composant, est de construire un pont de diviseur de tension. Nous utiliserons donc notre thermistance ainsi qu'une autre résistance de valeur égale à celle de la thermistance, soit $47\text{ K}\Omega$ dans notre cas. Pour former le pont schématiser ci- dessous :

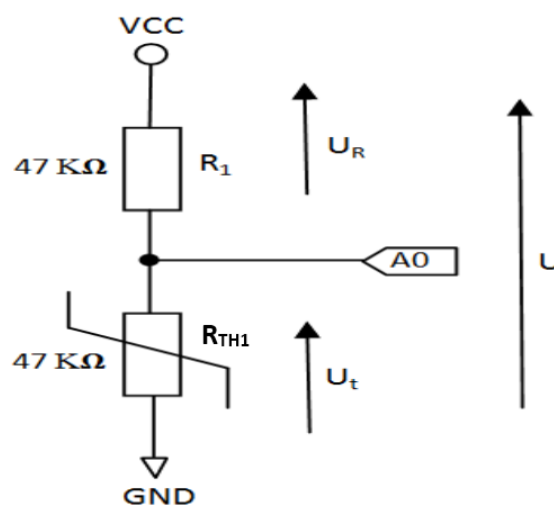


Fig IV.2 Schéma pont diviseur de tension

Chapitre IV: Réalisation du dispositif de mesure de température rotorique et application

Avec:

R_1 : Resistance.

R_{TH1} : Thermistance.

U_t : La tension aux bornes de la thermistance.

U_R : La tension aux bornes de la résistance.

U : La tension entre le haut et le bas du diviseur de tension donc c'est le VCC.

On fait retrouver l'expression de la tension U_T en fonction de la tension U :

$$U_T = \frac{R_{TH1}}{R_1 + R_{TH1}} * U \quad \text{(IV.1)}$$

La valeur de cette thermistance TH_1 est de $47 \text{ K}\Omega$ à 25°C et elle est variable, ce qui fait changer le courant qui circule dans le circuit et donc change aussi la tension U_T aux bornes de la thermistance.

La résistance R_1 fait $47 \text{ K}\Omega$, elle a pour rôle de limiter le courant qui circule dans le montage. Et la tension U est fournie par la carte Arduino et elle vaut 5V , on utilise un des ports d'entrée de la carte Arduino pour mesurer la tension aux bornes de la thermistance toutes les trois secondes. Le logiciel charge dans l'Arduino et traduit cette tension en température, et sera affichée sur l'écran de l'ordinateur.

IV.2.1 Choix des instruments de mesure

Le type de la mesure définira le type du capteur. Le choix du capteur adéquat dépend de différents critères à savoir: l'application, la précision, la fidélité, le temps de réponse, le prix, durée de vie (la robustesse) et sa forme, etc.

Dans notre projet nous recherchons la lecture de température la plus précise entre une plage de 20°C et 150°C , nous avons choisi une thermistance avec un indice de précision élevé de $\pm 0,2^\circ\text{C}$, ce qui en fait un excellent choix pour notre projet.

La valeur de la résistance est approximativement égale à la résistance de la thermistance. Dans ce cas, sa résistance est de $47 \text{ K}\Omega$, donc la résistance est également de $47 \text{ K}\Omega$.

Le fabricant de la thermistance peut vous indiquer sa résistance, mais sinon, vous pouvez utiliser un multimètre pour le savoir.

IV.2.2 Connexion des capteurs sur la carte Arduino

La connexion des composants se fait comme ceci:

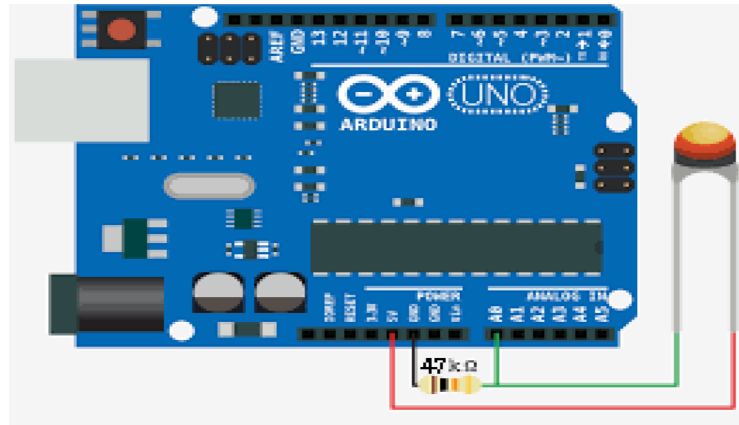


Fig IV.3 Schéma de montage

Dans la figure ci-dessus, nous avons représenté uniquement une seule résistance et une thermistance, les autres capteurs se font connecter de la même manière.

On peut alimenter l'Arduino de deux façons:

1. Connecter directement à l'ordinateur par le câble USB.
2. Installer et utiliser une batterie de 5 volts, dans le cas de besoin de mobilité.

IV.2.3 Programmation des capteurs sous Arduino

On programme l'Arduino à l'aide du logiciel IDE sur l'ordinateur. L'IDE nécessite un code de programmation C++ que nous avons inclus, voir Annexe D.

En utilisant l'USB, on connecte l'Arduino à l'ordinateur pour télécharger les données depuis l'EDI et les envoyer sur la carte Arduino, il suffit de cliquer sur la **flèche verte** située en haut à gauche de l'écran pour lancer le processus et enfin, il faut attendre environ 10 secondes pour permettre à toutes les données d'être transférées vers l'Arduino.

IV.2.4 Présentation et principe de l'essai pour l'étalonnage

L'étalonnage des capteurs de mesure est indispensable pour s'assurer des résultats de haute précision.

Chapitre IV: Réalisation du dispositif de mesure de température rotorique et application

IV.2.4.1 Définition de l'étalonnage

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

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

IV.2.4.2 Étalonnage des instruments de mesures

Dans cet essai on utilise un four dont la température est connue, cette température nous sert de référence pour étalonner les capteurs.

Le four utilisé pour l'étalonnage des appareils de mesure de température est une enceinte isotherme, sa température est connue et réglable, à partir de l'ambiante (T_{amb}) jusqu'à 250°C.

Ce four est alimenté par une source de tension de 380V, et doté d'un thermomètre numérique indiquant la température qui règne à l'intérieur du four (T_{four}) et une température de référence réglable (T_{ref}). On place les thermistances et les thermocouples à l'intérieur du four sur trois points différents mais chacun est proche de l'autre, et un thermomètre à mercure (T_{thermo}) gradué jusqu'à 50°C qui sert à mesurer la température ambiante pour les essais prochains. Au début de l'essai la température du four est réglée à la température ambiante, soit de 27°C.

Cet essai est représenté sur le schéma et l'image ci-dessous :

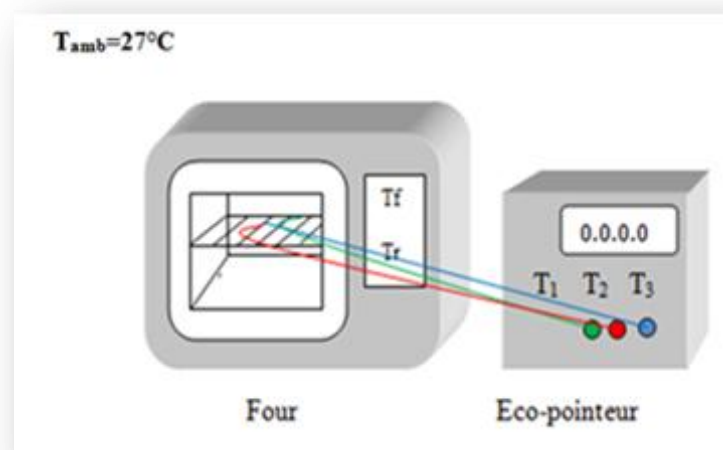


Fig IV.4 Schéma descriptif de l'essai d'étalonnage des capteurs

Chapitre IV: Réalisation du dispositif de mesure de température rotorique et application

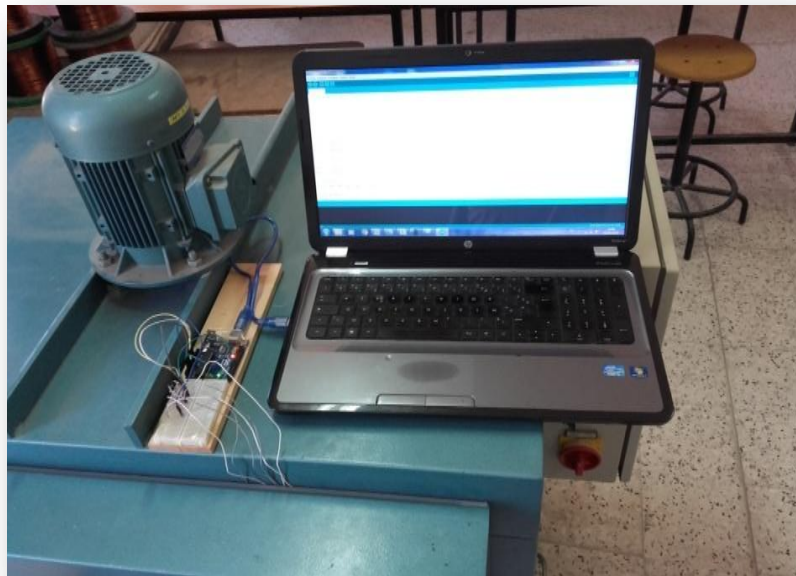


Fig IV.5 Image réelle de l'étalonnage des thermistances

- On prend les valeurs des cinq thermistances et celle du thermomètre. On met le four en marche et on fait varier sa température, à partir de l'ambient jusqu'à 140°C, avec un pas de 5°C et on relève les valeurs des cinq capteurs et celle du thermomètre.

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

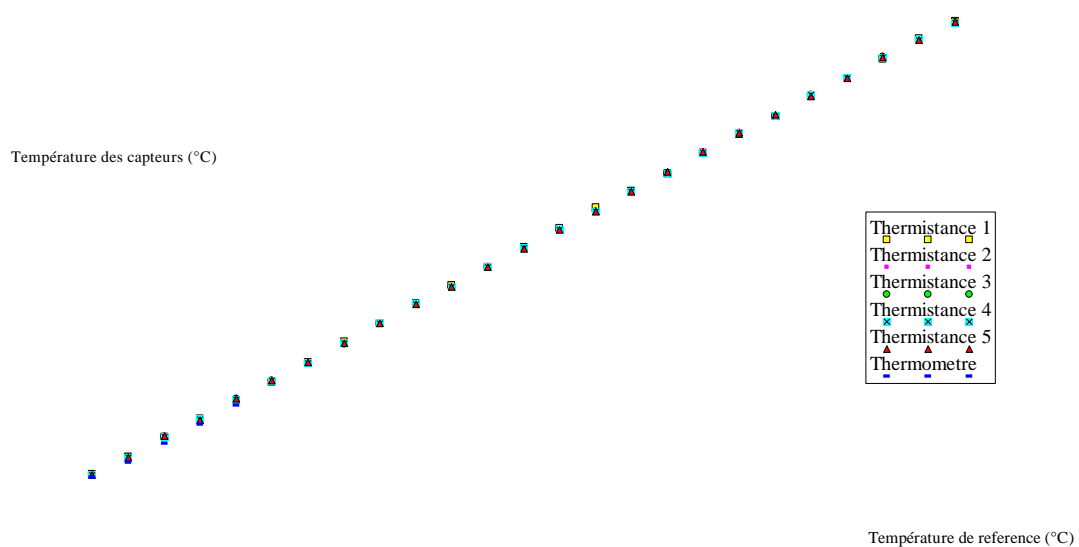


Fig IV.6 Courbe d'étalonnage des capteurs.

Chapitre IV: Réalisation du dispositif de mesure de température rotorique et application

Observations :

On constate qu'au début des mesures, les thermistances indiquent des valeurs qui ressemblent à celles de la référence et de même pour le thermomètre. Mais avec l'échauffement des capteurs à 160°C qui représentent un retard de réponse par rapport à la référence, avec une erreur d'environ 2°C, donc la température mesurée par les thermistances s'éloigne de la température de référence du four, vu que sa plage nominale de température est limitée.

- Au début de l'essai le thermomètre à mercure affiche une valeur proche de la température dans le four, puis avec l'échauffement du four il devient en retard de 2°C car le thermomètre à mercure est un appareil destiné à mesurer la température ambiante il n'est pas conçu pour répondre au changement rapides de température. Et sa température max est de 50°C.

IV.2.5 Simulation sous le logiciel ISIS Proteus

Avant la mise en marche du dispositif, une simulation est faite sous ISIS Proteus qui est un logiciel de simulation principalement connu pour éditer des schémas électriques. Par ailleurs, le logiciel permet également de simuler ces schémas ce qui permet de déceler certaines erreurs dès l'étape de conception.

La figure ci-dessous, montre le schéma de simulation de notre dispositif:

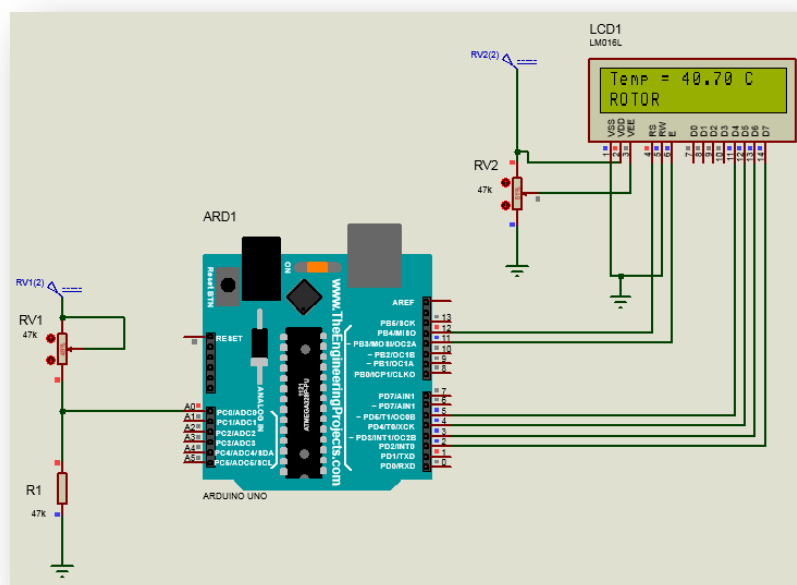


Fig. IV.7 Schéma du circuit réalisé sur Proteus.

Chapitre IV: Réalisation du dispositif de mesure de température rotorique et application

Le circuit est alimenté automatiquement sur le logiciel, on fait varier la valeur de la thermistance, c'est à dire varier la valeur de potentiomètre sur la simulation, puis il affiche la température du milieu sur un écran afficheurs LCD (Liquide Crystal Display), qui est à droite dans le montage.

IV.3 Application sur le moteur

Après réalisation et simulation du dispositif, on passe à sa mise en œuvre. Dans cette partie nous présentons le moteur à étudier et l'emplacement des capteurs dans ce dernier ainsi que les résultats obtenus.

IV.3.1 Présentation du moteur étudié

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

- Type 890-100-1064-0041.
- Marque ENEL (Électro-industriel) N°22-128-02
- Puissance 2.2 KW
- Fonctionne sous tension nominale 380v
- Courant nominal 5.2A en triangle
- Vitesse de rotation 1410 tr/min
- Facteur de puissance $\cos \varphi = 0.83$
- Class d'isolation F (155°)

IV.3.2 Description du banc de l'essai

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

- ✓ Source de tension de 380V.
- ✓ Source de tension de 220V.
- ✓ Un autotransformateur utilisé comme source de tension alternative variable (0-250V) et de courant variable (0-20A).
- ✓ Une génératrice à courant continu pour les essais en charge
- ✓ Différents appareils de mesure : ampèremètre, voltmètre, wattmètre, chronomètre, thermomètre à mercure.
- ✓ Capteur de température : thermocouple de type k, thermistance du NTC.

- ✓ Enregistreur de température CA 625 COPOINTEUR.
- ✓ Dispositif réalisé.
- ✓ Un système balais-bagues.

- **Présentation de l'ECOPOINTEUR**

L'Ecopointeur, a six voies de mesure, il enregistre toute variable physique préalablement en signale électrique comme la température, la pression, Le débit, la puissance, la vitesse. Les voies d'entrée sont indépendantes, six mesures peuvent êtres enregistré en même temps, comme on peut effectuer six autres mesures en utilisant des interrupteurs, en plus de ça il donne directement les valeurs de la température.

IV.3.3 Emplacement des capteurs dans le moteur asynchrone

On a choisi de placer les capteurs dans des endroits juger théoriquement les plus chauds, pour que l'étude soit plus judicieuse et plus complète. Ces capteurs sont relie à l'unité d'acquisition afin d'enregistrer les données mesurées puis les envoyer à l'ordinateur pour analyse et traitement. On peut rajouter d'autres captures selon le besoin.

Le moteur faisant l'objectif de la présente étude est équipé de sept thermocouples et quatre thermistances logés en différents endroits du moteur et une autre pour l'ambient. L'emplacement de ces capteurs est dicté par trois cratères essentiels, à savoir : l'accessibilité, la ventilation et la source de chaleur.

La numérotation ainsi que l'emplacement des capteurs dans le moteur sont représentés sur la Fig IV.8:

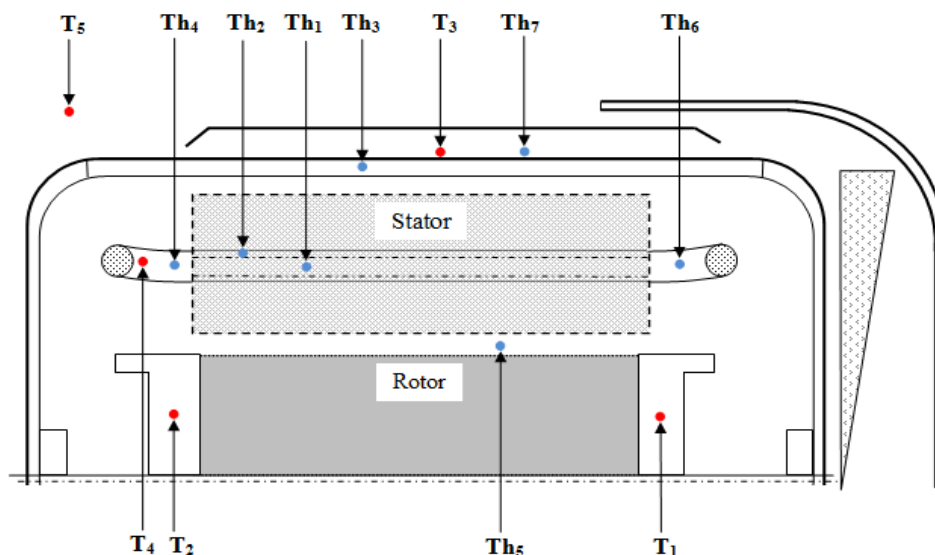


Fig IV.8 Schéma représentant la position des capteurs dans le moteur

Chapitre IV: Réalisation du dispositif de mesure de température rotorique et application

- Thermocouple (Th).
- Thermistance (T).

Les capteurs sont placés au niveau :

- T₁ : Du rotor côté ventilé.
T₂ : Du rotor côté non ventilé.
T₃ : De la carcasse.
T₄ : De la tête de bobine du stator côté non ventilé.
T₅ : Dans l'air.
Th₁ : De l'encoche statorique.
Th₂ : De la dent statorique.
Th₃ : Du l'interface.
Th₄ : De la tête de bobine côté non ventilé.
Th₅ : De l'entrefer.
Th₆ : De la tête de bobine côté ventilé.
Th₇ : De la carcasse.

IV.3.4 Isolation et mise en place des capteurs

IV.3.4.1 Isolations des capteurs et des files

Pour éviter le contact avec les parties actives de la machine, et aussi pour éviter les courts circuits entre les bornes des thermistances, une bonne isolation des capteurs est nécessaire. Dans notre cas l'isolation est faite avec du téflon comme montré sur les figures suivantes:



Fig IV.9 Capteurs avec l'isolant

Chapitre IV: Réalisation du dispositif de mesure de température rotorique et application

IV.3.4.2 Emplacement réel des capteurs sur l'anneau du rotor

Pour un excellent contact thermique des thermistances, nous avons percé l'anneau du rotor afin de bien placer les capteurs, en rajoutant une colle spéciale qui résiste à la chaleur, pour priver ces capteurs du mouvement lors de la rotation du rotor. Voir images suivantes :



Fig IV.10 Image de l'emplacement du capteur du côté ventilé



Fig IV.11 Image de l'emplacement du capteur du côté non ventilé

Voir aussi la position de la thermistance et le thermocouple sur la carcasse, images suivante :



Fig IV.12 Emplacement du capteur sur la carcasse

IV.3.5 Les différents essais expérimentaux effectués sur la machine

On a effectué deux essais, qui sont, essai à vide et en charge. Dans ces essais le rotor est relié à la masse, les têtes des thermistances doivent être isolé d'une façon qu'elles ne soient pas connecté à la masse.

IV.3.5.1 Essai à vide

Cet essai consiste à alimenter le moteur avec sa tension nominal mais sans être couplé à la charge.

IV.3.5.2 Essai en charge

Cet essai nous permet d'étudier l'échauffement de la machine pendant son fonctionnement en régime nominal dans des conditions normales et aussi mesuré l'évolution de la température.

IV.3.6 Influence et perturbation sur le circuit

Une telle réalisation n'est pas dénuée de difficultés. Il est à noter que nous nous sommes confrontés à plusieurs problèmes surtout dans la partie réalisation du dispositif.

Cependant, on peut dire que malgré ces difficultés, les résultats obtenus à travers cette étude qu'ils soient pratiques ou théoriques, permettent d'ouvrir la porte à d'autres études.

IV.3.6.1 Influence du système bagues balais

Au court de notre travail nous avons rencontré des difficultés de mesure de température au niveau du rotor auquel on accède par l'intermédiaire d'un système balais bagues qui est montré sur la figure ci-dessous (Fig IV.13).

Il existe une chute de tension ou une perturbation de mesure aux bornes des capteurs utilisés, pour déterminer cette erreur, on a entraîné le moteur étudié par un autre moteur avec une vitesse de rotation situé dans les limites de fonctionnement nominal.

Vers la fin nous avons déduit une chute de tension équivalente à une température de l'ordre 2°C, qui nous a permis de corriger les températures rotorique.

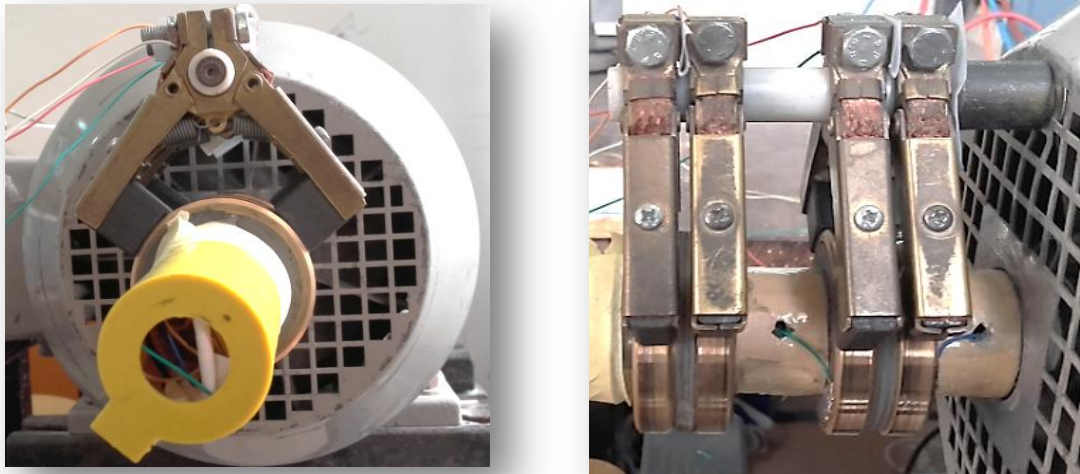


Fig IV.13 Le système Bagues-Balais

IV.3.6.2 Perturbation du signal par des parasites

On nomme perturbation, un signal électrique parasite qui vient se superposer à un signal utile. Ces perturbations sont d'autant plus gênantes qu'elles affectent défavorablement le circuit. Lorsqu'un signal parasite s'infiltré dans le signal utile, c'est très difficile de le supprimer, ce qui engendre des erreurs de mesure importantes.

Les origines de ces perturbations sont nombreuses, à savoir:

- **Origine technique:** Mauvaise conception du circuit, absence de blindages, mauvais contact...etc.
- **Origine environnementale:** Action des grandeurs d'influence telles que la température ou l'humidité (dilatation, variations de résistivité, vieillissements, défauts d'isolement ...)

Les figures suivantes, représentent le signal obtenu lors de la mesure de la température en fonction de temps (ms) dans la machine, et cela dans des conditions favorables et défavorables.

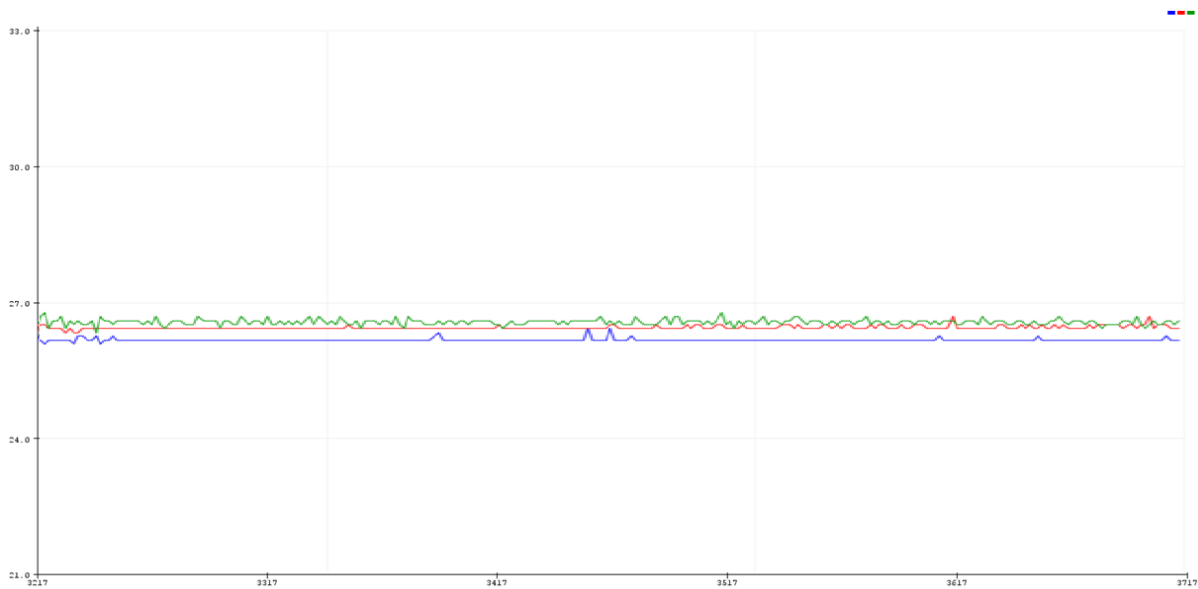


Fig IV.14 Mesure dans des conditions favorables

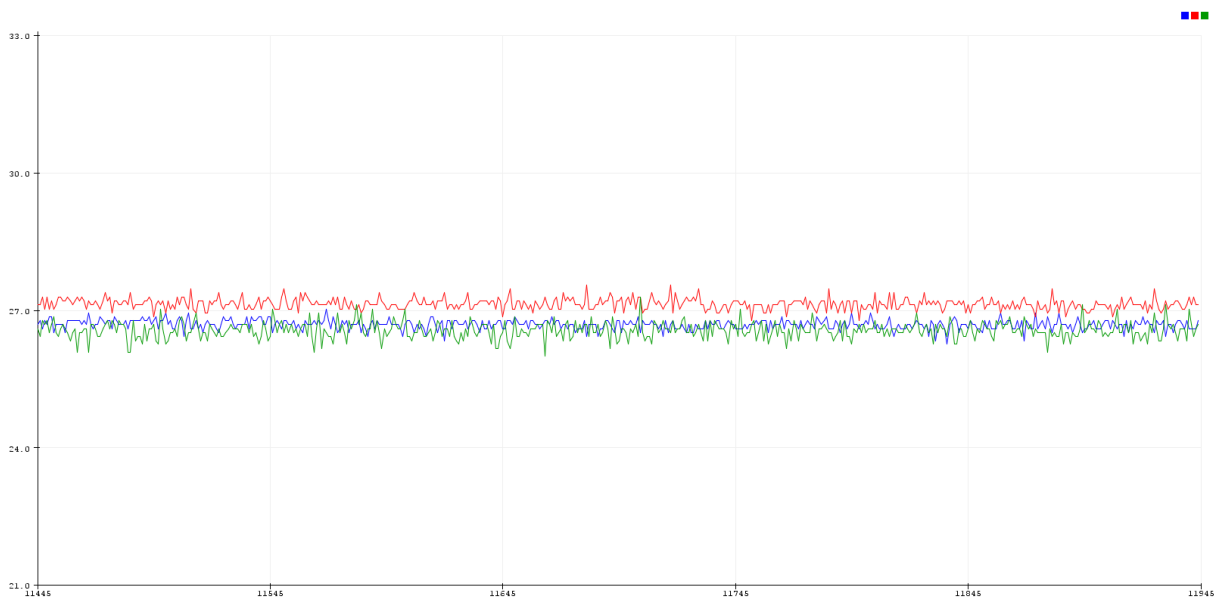


Fig IV.15 Mesure dans des conditions défavorables

IV.3.7 Les courbes obtenues dans les essais

Les essais effectués au labo de construction de machine, était sous une température de 27°C au début. Vers la fin (130 min de l'essai) elle a atteint les 30°C. Le thermocouple donne 28°C or que la thermistance donne 27°C, notons que dans tout ce qui suit, les points considérés pour le tracé de l'évolution de la température en fonction du temps sont les mêmes. Cela nous permet de comparer les résultats.

IV.3.7.1 Courbes obtenues à l'aide des thermocouples

Pour voir l'évolution de la température dans la machine en fonction du temps, nous avons pris un point dans plusieurs régions de la machine pour tout régimes de fonctionnement du moteur, qui est mesuré par les thermocouples.

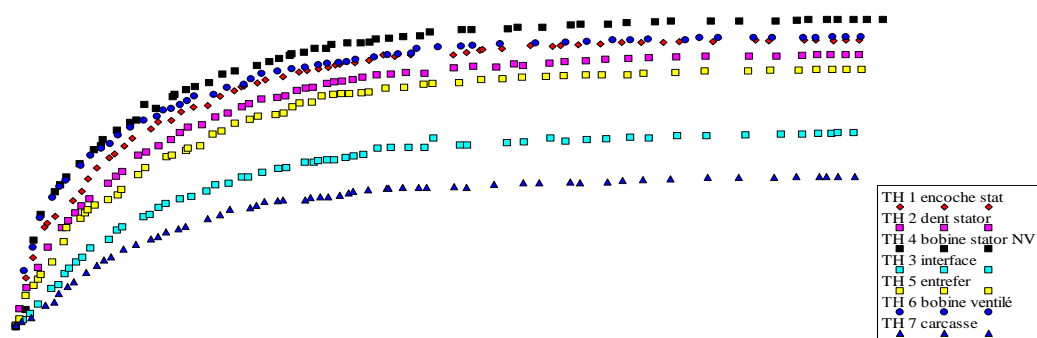


Fig IV.16 Évolution de la température dans le moteur en fonction du temps en charge nominale par thermocouple.

Ces courbes représentent les différentes températures mesurées avec les thermocouples placés sur les différentes régions statorique de la machine en fonction du temps. On constate une augmentation rapide de la température pendant les 50 premières minutes puis commence à se stabiliser dans toutes régions mesurées.

La bobine du stator (**TH4**), représente la partie la plus chaude dans le moteur (108°C), tandis que le thermocouple placé sur la carcasse (**TH7**) indique la partie la plus froide dans la machine qui est d'une valeur de 66°C.

IV.3.7.2 Courbes obtenues à l'aide des thermistances

L'évolution des températures dans les différentes parties de la machine en fonctionnement du moteur en charge nominale qui sont mesurées par les thermistances sont illustrés sur la figure suivante (Fig IV.17).

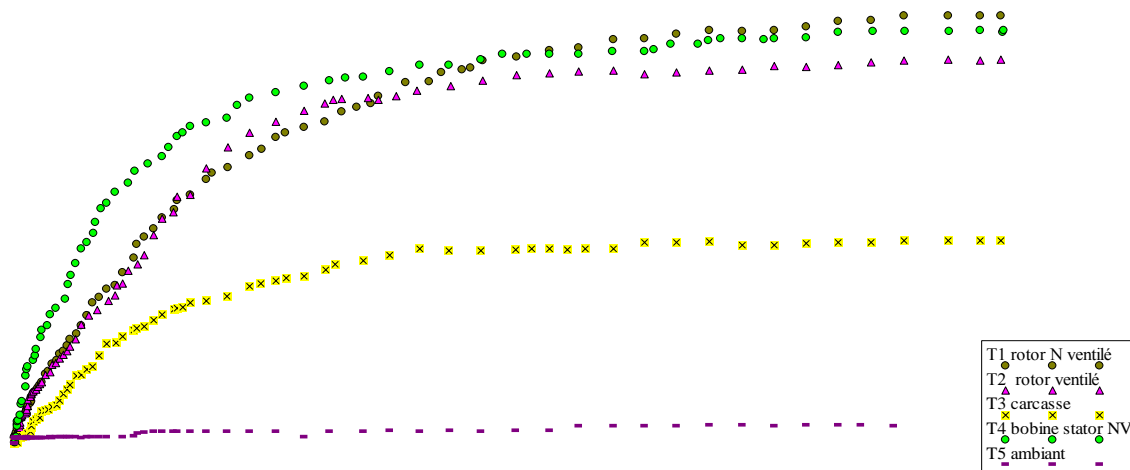


Fig IV.17 Évolution de la température dans le moteur en fonction du temps en charge nominal par thermistance.

Au niveau du rotor, on remarque une élévation de température comparativement à d'autres parties constituant le moteur. Dans cette courbe on voit qu'au démarrage du moteur, la tête de bobine statorique (T4) atteint une valeur de 95°C plus rapidement que le rotor, et cela dans les premières 10 minutes, en suite c'est le côté non ventilé du rotor qui se chauffe le plus, jusqu'à atteindre les 110°C.

Nous avons remarqué une grande différence dans l'augmentation de la température au niveau des bobines et du rotor par rapport à la carcasse. En revanche la chaleur au niveau du stator est plus importante que la carcasse car le stator est en contact direct avec les bobines. Dans ce cas, le transfert de chaleur se fait par conduction entre les bobines et le paquet statorique et entre le stator et la carcasse.

La température ambiante (T5), augmente légèrement tout au long de l'essai, à noter qu'au début le capteur nous indique 27°C, et vers la fin de l'essai elle atteint 30°C, et cette température a une influence sur la température de la machine.

IV.3.7.3 Comparaison entre les températures mesurées par thermocouples et thermistances

Dans cette figure (Fig IV.18), nous avons présenté des courbes qui donnent la température mesuré dans les enroulements du stator et la carcasse du moteur.

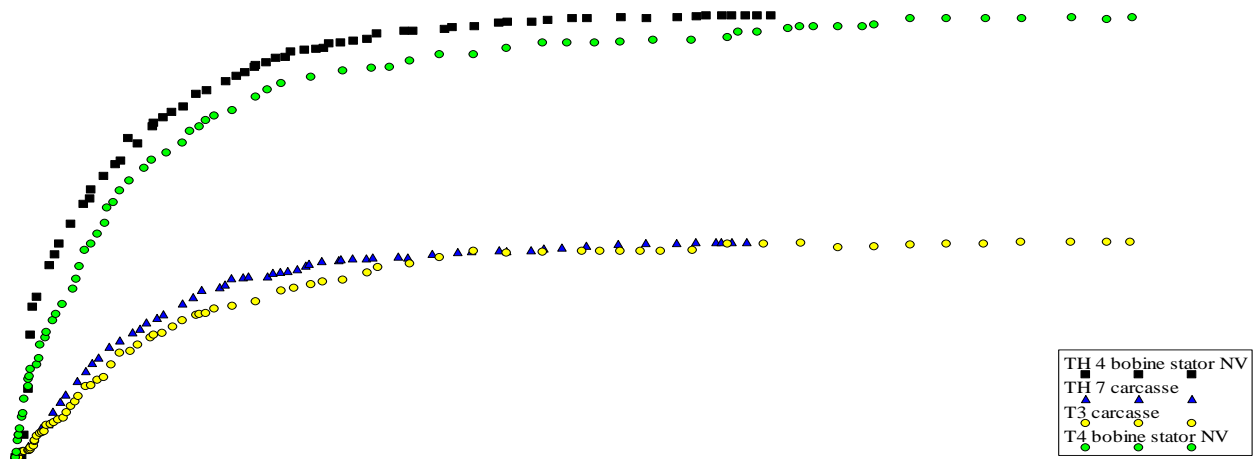


Fig IV.18 Évolution de la température en fonction du temps, relevée par thermistances et thermocouple en charge.

On remarque qu'au démarrage du moteur la température mesuré par le thermocouple est plus importante que la thermistance est ça c'est dû au fait que le temps de réponse du thermocouple est rapide par rapport à la thermistance, mais vers la fin après un temps (60 min) de fonctionnement, les deux capteurs atteint des valeurs de températures plus proches.

IV.3.7.4 Comparaison entre les courbes de température rotorique relevées par les thermistances

Dans la figure suivante (Fig.IV.19) les courbes de température relevée par les thermistances au niveau du rotor sont comparées entre elles.

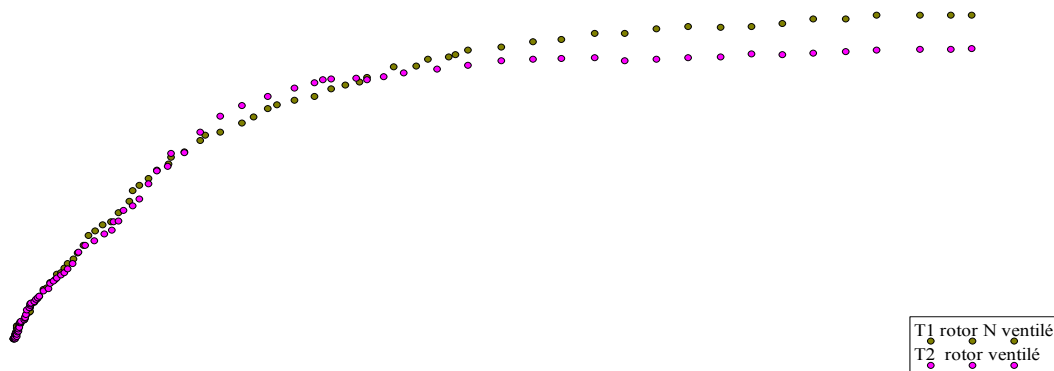


Fig IV.19 Évolution de la température rotorique en fonction du temps, relevée par thermistances en charge

On remarque que l'évolution de la température rotorique est la même pour les deux côtés au démarrage du moteur, puis le côté non ventilé s'échauffe plus que le côté ventilé à partir de la 70ème minute, jusqu'à atteindre une température de 110°C puis elle se stabilise.

IV.3.7.5 Figures obtenues par le traceur série à l'arrêt du moteur

Les courbes obtenues par le traceur série sont représentés sur la figure ci-dessous (Fig IV.20):

- La thermistance qui se trouve sur le stator donne la courbe en orange.
- La thermistance qui se trouve sur la carcasse donne la courbe en vert.
- La thermistance qui se trouve sur le rotor côté ventilé donne la courbe en rouge.
- La thermistance qui se trouve sur le rotor côté non ventilé donne la courbe en bleu.
- La thermistance qui se trouve dans l'air donne la courbe en violet.

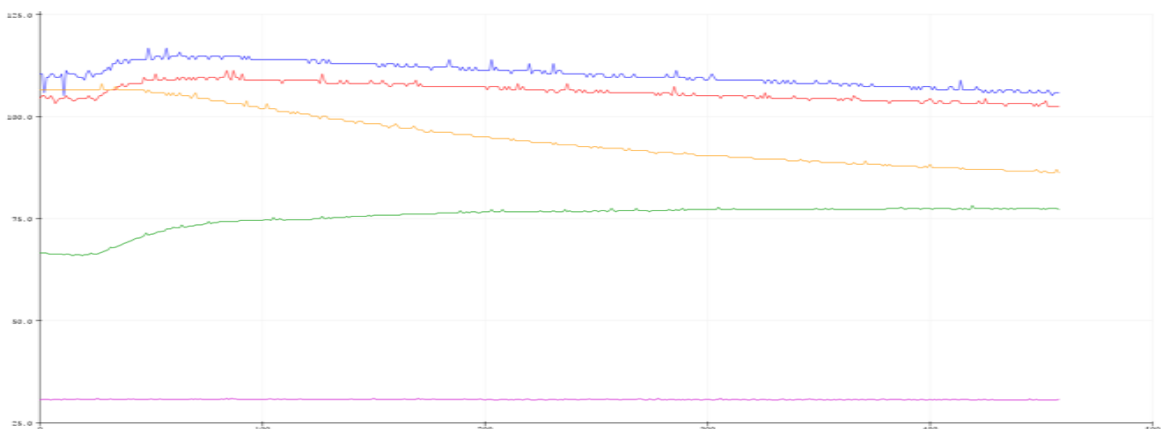


Fig IV.20 les courbes représentant la température à l'arrêt du moteur

Chapitre IV: Réalisation du dispositif de mesure de température rotorique et application

Sur ces courbes sont obtenus à l'arrêt du moteur, après le régime permanent en charge, on remarque une chute de température au niveau des bobines du stator, jusqu'à atteindre la température ambiante. Par contre, la température du rotor augmente au bout d'un moment, du fait qu'il y a un transfert de la chaleur du centre du rotor vers les extrémités, puis commence à chuter progressivement jusqu'à atteindre la température ambiante.

On remarque aussi la courbe de la carcasse augmente progressivement. Dans ce cas le transfert de chaleur se fait du centre du moteur vers le milieu extérieur. Ce qui fait augmenter la température de la carcasse.

IV.3.8 Comparaison entre les moyens et méthode de mesure

Le tableau suivant représente la comparaison entre les moyens et méthode de mesure de température en °C au régime établi en charge nominale du moteur asynchrone.

Tab IV.1 Comparaison entre les moyens et méthode de mesure

	Carcasse	Stator	Rotor
Thermocouple	67.10	108.80	----
Thermistance	67.19	108.59	111.45
FEMM	[67.00 ; 69.32]	[83.27 ; 90.24]	[111.20 ; 113.50]

Lors des essais effectués sur la machine, les moyens de mesure utilisés (thermocouples et thermistance) placés dans les mêmes endroits, indiquent des valeurs très proches, à savoir que ces valeurs appartiennent à la plage de température trouvée dans la simulation sous le logiciel FEMM.

La simulation sous le logiciel FEMM donne la répartition de la température en tous points de la machine, mais cette simulation demande une connaissance approfondie des différents paramètres de la machine, contrairement aux autres moyens de mesure utilisés

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons parlé de la réalisation du dispositif de mesure de température rotorique qui a été réalisé au sein du labo Construction Machine, et on décrivant toutes les étapes menant à sa mise en marche.

La réalisation des circuits électroniques avec les cartes Arduino, entraîne des problèmes et des perturbations de divers origines qui influencent leur fonctionnement, et dans le nôtre cas pratique, nous avons eu des perturbations et des influences sur les résultats et les valeurs de température mesurées au niveau du rotor de la machine asynchrone, qui sont dus à des différentes sources, tel que le mauvais contact des capteur, l'influence du système balais...

Parmi les méthodes de mesures théoriques et expérimentales, chaque un d'eux à ses propres avantages et inconvénients, de ce fait le choix du moyen revient au besoin d'utilisation et la technologie disponible, on ce qui concerne la réalisation de notre dispositif, le meilleur moyen est d'utiliser des thermistances avec Arduino pour avoir les résultats espérés.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les pertes résultantes lors de la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique, dans les moteurs asynchrone, se manifestent sous forme de chaleur, à noter que ses pertes sont pas toutes facile à déterminer.

Cette chaleur est transférée dans la machine par trois modes de transfert suivants : Convection, conduction, rayonnement. Et vu les dommages que provoque cette chaleur, une étude thermique est nécessaire afin de savoir sa répartition, cette étude se fait soit avec des méthodes théoriques ou par des méthodes expérimentale. Dans notre cas nous avons utilisés une méthode théorique, à l'aide d'un logiciel de simulation, dit FEMM, ce logiciel nous a permet de voir la répartition de la chaleur dans toutes les régions de la machine étudiée.

Avec le développement technologique et l'amélioration des moyens de mesure de température, cette dernière peut se mesurer en tout endroit de la machine en plein fonctionnement, le choix du moyen de mesure dépend de plusieurs critères désirés, sachant qu'ils diffèrent en termes de précision, stabilité, temps de réponse, exactitudes.... Et dans notre réalisation, nous avons opté pour des capteurs à thermocouple et à thermistance que nous jugeons adéquat à notre réalisation.

L'étude des comportements thermiques des machines électriques présente actuellement un très grand intérêt, on s'intéressé à la conception et réalisation d'un système de mesure de température rotorique d'un moteur asynchrone à cage dans le but concevoir un modèle thermique adapté pouvant être utilisé comme outil pour la construction de moteurs à induction à cage et pour décrire les problèmes et aspects de la mise en œuvre.

Pour cela nous avons utilisé des capteurs connectés à une carte Arduino, qui est un système qui facilite la mesure de la température au niveau du rotor de la machine étudié, en donnant des valeurs avec précision et exactitude.

- **Perspectives :**

Améliorer l'afficheur et utiliser un système sans fils au avec le Bluetooth pour éviter le passage par le mécanisme Balais-Collecteur qui fait chute de tension et perturbé le signal.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **Théodore WILDI, Gilbert SYBILLE**, Électrotechnique. 4ème, 3ème et 8ème édition. Édition De Boeck.2005.
- [2] **Michel POLOJADOFF**, Machine asynchrone, régime permanent. Technique de l'ingénieur, traité génie électrique. D3480, 1998.
- [3] **A. GUENON, W. LEGROS**, « Machines électrique », Edition HERLES Science Europe, 2000.
- [4] **B. BOUKHARI, T. AMINI**, « Calcul des pertes fers dans la machine asynchrone ». Mémoire, master électrotechnique, UMMTO, 2017.
- [5] **A. K, S. Y**, « Étude des pertes fer et leur répartition dans un moteur asynchrone à cage d'écureuil 2.2KW ». Mémoire de fin d'étude, master académique, 2013.
- [6] **H. IFREK, T. HAOUCHINE**, « Études thermique du moteur asynchrone à cage d'écureuil ». Mémoire de fin d'étude, Master académique, UMMTO, 2011.
- [7] **B. EYGLUNENT**, « Manuel de thermique » Edition HERMES science publication, 2eme édition revue et augmentée, paris 1997.
- [8] **N. DAFEUR**, « modélisation thermique par éléments finis d'un moteur asynchrone à cage ». Mémoire de magister UMMTO, 2010.
- [9] **K. MEDANE**, « mesure de la température dans le rotor d'une machine asynchrone à cage ». Mémoire de fin d'études, master professionnel, UMMTO, 2014.
- [10] **S. MEZANI**, « Modélisation thermique d'un moteur asynchrone a cage » mémoire de magister, U.S.T.H.B, 2000.
- [11] **G. RAKOTONIRINA**, « Modélisation Thermique des moteurs asynchrones à cage, par la méthode des éléments finis », Thèse de doctorat en génie électrique, université de Québec à Trois-Rivières, Avril 2001.
- [12] **M. LIWSHITZ, L.MARRET**, « calcul des machines électriques » Tome I Edition SPES Lausanne (suisse) 1967.
- [13] **Zhu D. S**, « Modélisation des machines asynchrones alimentées par des convertisseurs statiques. Étude des performances électriques et thermiques ». Thèse de doctorat, I.N.P, de Grenoble (France), Mai 1990.
- [14] **D. WIDED**, « Conception et dimensionnement des machines asynchrones de petite et moyenne puissance » Thèse de doctorat en science technique, école polytechnique fédérale de Lausanne, 2001.
- [15] **J. CHEAYTANI**, « Calcul par des éléments finis des pertes supplémentaires des les motorisations performantes », Thèse de doctorat en science technique, université Lille I (France), février 2016.

Références bibliographiques

- [16] **M. BOUHERAOUA**, « Contribution à la modélisation Thermique d'un moteur asynchrone à cage ». Thèse de doctorat en électrotechnique, UMMTO, décembre 2008.
- [17] **M. FERRETTI**, « Mesure et contrôle industriels », EME, Paris, 1997.
- [18] **N.LARKECHE, K.MAHMOUDI**, « Mesure expérimentales de l'échauffement d'une machine asynchrone à cage de puissance 2.2KW ». UMMTO, 2006.
- [19] **G. ASCH**, « Les capteurs en instrumentation industrielle. ». Dunod, Paris, 1999.
- [20] **S. SIAGHI S**, « Mesure de la température dans une encoche statorique d'une machine asynchrone à cage ». Mémoire de fin d'étude, Master académique, UMMTO.2015.
- [21] **A. NESSAH H. OUMEZZAOUCHE**, « Modélisation thermique d'un stator creux d'une machine asynchrone ». Mémoire de fin d'étude, Master académique, UMMTO.2017.
- [22] **M. BELMKDAD, S. BERRAH**, « étude expérimentale thermique d'un moteur asynchrone auto-ventilé ». Mémoire, master électrotechnique, UMMTO, 2013.
- [23] **D. MOULAI ZAZI**, « Contribution à l'étude thermique des machines asynchrones alimentées par des convertisseurs électrique ». Mémoire de magister. UMMTO. 2002.
- [24] **J.F. SACADURA**, « Initiation Aux Transferts Thermiques » Edition Technique et Documentation, centre d'actualisation scientifique et technique INSA de Lyon, paris 2000.
- [25] **R. KHALDI**, « Etude expérimentale du comportement thermique du moteur asynchrone alimenté par convertisseur » Mémoire de magister, U.S.T.H.B. Alger, Décembre 1996.
- [26] **S. BADACHE**, « Contribution à la modélisation thermique d'une machine à reluctance variable à double saillance (MRV6/4) par éléments finis en 2D et 3D » Thèse doctorat en électrotechnique, USTOMB, Oran décembre 2008.
- [27] **Z. BOUROUROU, A. LAMA**, « Réalisation d'un thermomètre à LEDs ». Mémoire de fin d'étude, master académique, UABBT, Tlemcen 2015.
- [28] **I. KWANGAYA, A. BOUCHERIFI**, « Etude et réalisation d'un capteur de température basé sur le Ds18B20 ». Mémoire de fin d'étude, Master académique, UABBT, Tlemcen 2016.

A n n e x e s

Annexe A

A.1 Caractéristique nominal de la machine

Tableau A.1 caractéristiques nominales de la machine

Caractéristiques	Valeurs	Unités
Puissance utile	2.2	KW
Nombre de phases	3	/
Fréquence d'alimentation	50	Hz
Vitesse de rotation	1410	Tr/mn
Glissement	4.66	%
Tension d'alimentation	380	V
Connexion des enroulements	Triangle (Δ)	/
Courant absorbé	5.2	A
Facteur de puissance	0.83	/
Rendement	78	%
Résistance d'une phase au stator à 20°C	7.63	Ω
Hauteur d'axe	100	mm
Couple nominal	15	mm
Couple démarrage/ Couple nominal	2.3	/
Couple max./ Couple nominal	2.6	/
courant démarrage/ courant nominal	5.9	/

A.2 Dimension géométrique de la machine

Tableau A.2 dimensions de la carcasse

Composantes	Valeurs	Unités
Diamètre extérieur	153	mm
Diamètre intérieur	145	mm
Longueur axiale	192	mm
Nombre d'ailettes	40	
Hauteur de l'ailette	20	mm
Distance entre deux ailettes	10	mm

Annexe A

Tableau A.3 dimensions du stator

Composantes	Valeurs	Unités
Diamètre extérieur	145	mm
Diamètre intérieur	88.5	mm
Diamètre intérieur de la culasse	119.53	mm
Longueur axiale	110	mm
Nombre d'encoches	36	/
Section de l'encoche	96.4	mm ²
Epaisseur du caniveau d'encoche	0.225	mm
Nombre de brins actifs par encoche	64	/
Diamètre du conducteur nu	0.71	mm
Diamètre du conducteur isolé	0.753	mm
Section du cuivre dans l'encoche	25.34	mm ²
Epaisseur de l'entrefer	0.25	mm
Classe d'isolation	F	/

Tableau A.4 dimensions du rotor

Composantes	Valeurs	Unités
Diamètre extérieur	88	mm
Diamètre extérieur de la culasse	57.75	mm
Diamètre de l'arbre	37	mm
Longueur axiale	110	mm
Nombre d'encoches	28	/
Section de l'encoche	45.33	mm ²
Biais d'encoche	1	/
Diamètre extérieur de l'anneau de court circuit	86.5	mm
Diamètre intérieur de l'anneau de court circuit	48	mm
Nombre d'ailettes à l'extrémité de l'anneau de court circuit	7	/

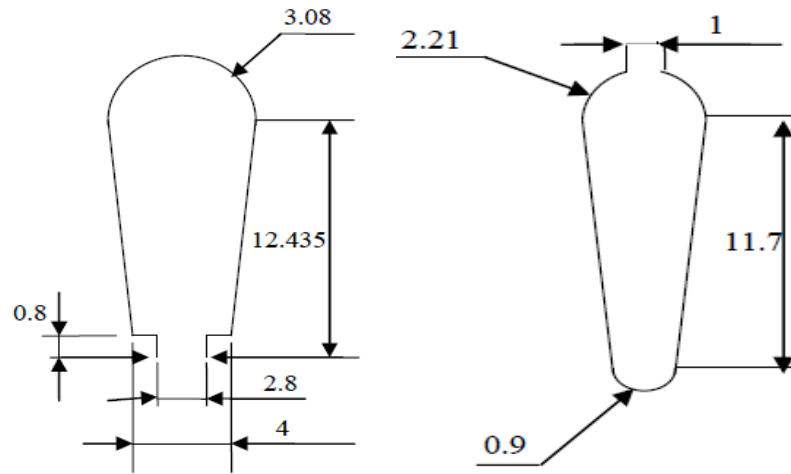


Figure A.1 Forme et dimensions des encoches

Annexe B

B.1 Programme sous MATLAB pour le calcul de pertes et la densité de perte.

```
%Calcul du volume total des encoches statoriques (Venc) [m3]%
z=36; %Nombre d'encoche de stator creux
D=2*3.08e-003; %Largeur maximale de l'encoche [m]
ben1=4e-003; %Largeur minimale de l'encoche [m]
L=0.11; %Longueur du paquet de tôles[m]
bf1=2.8e-003; %la largeur de la dent [m]
hf1=0.8e-003; %Hauteur de la fente [m]
hz1=11.62e-003; %Hauteur de la dent [m]
hen1=hz1-D/2-hf1; %%Hauteur utile d'encoche [m]
V1=(pi*((D^2)/4)/2)*L; %Volume du demi cercle [m3]
V2=((bf1+ben1)/2)*hz1*L; %Volume de Trapèze [m3]
V3=bf1*hf1*L; %Volume du rectangle [m3]
Venc=(V1+V2+V3)*z %Volume total des encoches statoriques [m3]

%Calcul le volume de cylindre creux (Vcy) [m3]
Dext=0.145; %Diamètre extérieur du stator creux [m]
Dint=0.0885; %Diamètre intérieur du stator creux [m]
Vcy=L*(pi*(Dext^2-Dint^2)/4); %Volume du stator creux avec les encouche [m3]
Vts=Vcy-Venc %Volume du paquet de tôle statorique [m3]

%%Calcul de la densité de perte cuivre au niveau des encoches (Dcu)[W/m3]
Nsp=64; %nombre de spires par section
R=7.63; %La résistance mesurée dans la deuxième phase à T=20°C [ohm]
L2=0.11*Nsp; %Longueur du conducteur [m]
S=0.396*10^-6; %Section totale des fils non isolés [m^2]
ro=1.724*10^-8; %La résistivité du cuivre à T=30°C [Ohm.m]
R1=(ro*L2)/S; %La résistance de l'ensemble de fil dans une encoche [ohm]
R2=R1*z; %La résistance de l'ensemble de fil dans les encoche [ohm]
k=234.5; %Constante de température caractéristique du cuivre à T=30°
Vcu=L2*S; %Le volume de l'encoche occupé par les conducteurs [m3]
```

Annexe B

%% Les pertes cuivre au niveau des encoches à vide (D_{cu}) [W/m³]

$T_2=70$; % Température finale après l'essai à vide [°C]
 $T_1=20$; % Température ambiante avant l'essai à vide [°C]
 $I_v=1.73$; % Courant simple de la phase à vide [A]
 $P_{jv}=3 \cdot R_2 \cdot I_v^2$; % Pertes joule des conducteurs dans les encoches à vide [W]
 $D_{cu}=P_{jv}/V_{cu}$ % La densité du cuivre dans l'encoche statorique à vide [W/m³]
 $R_4=R_2 \cdot ((T_2+k)/(T_1+k))$; % La résistance du conducteur dans les encoches [Ohm]

%% Les pertes cuivre au niveau des encoches en charge (D_{cu}) [W/m³]

$T_3=100$; % Température finale après l'essai en charge [°C]
 $T_1=20$; % Température ambiante avant l'essai en charge [°C]
 $R_2=R_2 \cdot ((T_3+k)/(T_1+k))$; % La résistance du conducteur dans les encoches [Ohm]
 $I_c=3$; % Courant simple de la phase en charge [A]
 $P_{jc}=3 \cdot R_2 \cdot I_c^2$ % Pertes joule des conducteurs dans l'encoche en charge [W]
 $D_{cu}=P_{jc}/V_{cu}$ % La densité du cuivre dans l'encoche statorique en charge [W/m³]

%% Calcul de la densité de perte dans le fer du stator creux (D_f) [W/m³]

$P_m=48$; % Pertes mécaniques déterminées par le wattmètre dans les phases [W]
 $P_{t1}=260$;
 $P_{js}=P_{jc}$; % Pertes mesurées par le wattmètre dans les phases [W]
 $P_f=134.12$;
 $P_{t1} = P_{js} + P_m + P_f$
 $D_{Pf}=P_f/V_{ts}$ % Densité de pertes dans le fer [W/m³]

C.1 Simulation sur le logiciel Proteus (isis)

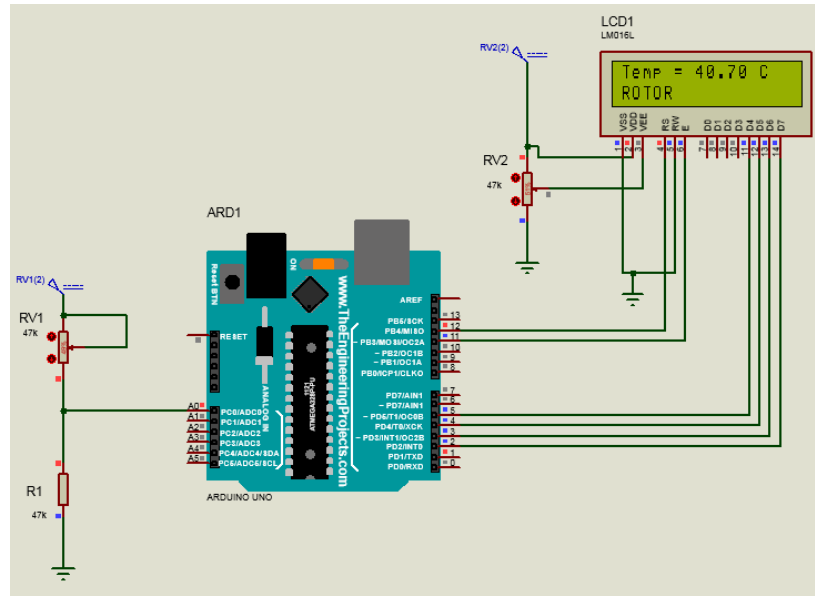


Figure C.1 représente schéma de simulation du montage

C.2 Programme Arduino UNO pour la simulation sur logiciel Proteus

```
#include <LiquidCrystal.h>
```

```
int ThermistorPin=0;
```

```
int vo;
```

```
float R1 = 47000;    // 47 KΩ
```

```
float logR2, R2,T;
```

```
float c1 = 1.004249522e-03, c2 = 2.378405444e-04, c3 = 2.019202697e-07;
```

```
LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);
```

```
void setup () {
```

```
  Serial.begin(9600);
```

```
  lcd.begin(16,2);    //Tell Arduino to staryour 16 colomn 2 row LCD
```

```
}
```

Annexe C

```
void loop () {  
  vo = analogRead (ThermistorPin);  
  R2 = R1 * (1023.0 / (float)vo - 1.0);  
  logR2 = log(R2);  
  T = (1.0/ (c1 + c2*logR2 + c3*logR2*logR2*logR2));  
  T = T - 273.15;  
  //T = (T*9.0)/5.0 + 32.0;  
  
  lcd.setCursor (0,0); //Set LCD cursor to upper left corner, colum0, row 0  
  lcd.print ("Temp = ");  
  lcd.print (T);  
  lcd.print (" C ");  
  
  lcd.setCursor (0,1); //Set LCD cursor to upper left corner, colum0, row 1  
  lcd.print ("Temperature du ROTOR ");  
  delay (1000);  
  lcd.clear ();  
}
```

Annexe D

D.1 Programme utilisé sous C++ pour la mesure de température du rotor d'un moteur asynchrone avec des capteurs CTN. Et la carte arduino UNO

```
//Thermometer with thermistor
//thermistor parameters:
RT0: 47 000 Ω
B: 4090 K +- 0.75%
T0: 25° C +- 5%
*/

//These values are in the datasheet
#define RT0 47000 // Ω
#define B 4090 // K
//-----
#define VCC 5 //Supply voltage
#define R 47000 //R=47KΩ

//Variables
Float t, T0, RT, VR, ln, TX, VRT, RT1, VR1, ln1, TX1, VRT1, RT2, VR2, ln2, TX2,
VRT2, RT3, VR3, ln3, TX3, VRT3, RT4, VR4, ln4, TX4,VRT4;

Void setup () {
Serial.begin (9600);
T0 = 27.50 + 273.15; //Temperature T0 from datasheet, conversion from Celsius to kelvin
t = 0;
}

Void loop () {
VRT = analogRead (A0); //Acquisition analog value of VRT
VRT1 = analogRead (A1);
VRT2 = analogRead (A2);
VRT3 = analogRead (A3);
VRT4 = analogRead (A4);

VRT = (5.00 / 1023.00) * VRT; //Conversion to voltage
VRT1 = (5.00 / 1023.00) * VRT1;
```

Annexe D

$$\text{VRT2} = (5.00 / 1023.00) * \text{VRT2};$$

$$\text{VRT3} = (5.00 / 1023.00) * \text{VRT3};$$

$$\text{VRT4} = (5.00 / 1023.00) * \text{VRT4};$$

$$\text{VR} = \text{VCC} - \text{VRT};$$

$$\text{VR1} = \text{VCC} - \text{VRT1};$$

$$\text{VR2} = \text{VCC} - \text{VRT2};$$

$$\text{VR3} = \text{VCC} - \text{VRT3};$$

$$\text{VR4} = \text{VCC} - \text{VRT4};$$

$$\text{RT} = \text{VRT} / (\text{VR} / \text{R}); \quad //\text{Resistance of RT}$$

$$\text{RT1} = \text{VRT1} / (\text{VR1} / \text{R});$$

$$\text{RT2} = \text{VRT2} / (\text{VR2} / \text{R});$$

$$\text{RT3} = \text{VRT3} / (\text{VR3} / \text{R});$$

$$\text{RT4} = \text{VRT4} / (\text{VR4} / \text{R});$$

$$\ln = \log (\text{RT} / \text{RT0});$$

$$\ln1 = \log (\text{RT1} / \text{RT0});$$

$$\ln2 = \log (\text{RT2} / \text{RT0});$$

$$\ln3 = \log (\text{RT3} / \text{RT0});$$

$$\ln4 = \log (\text{RT4} / \text{RT0});$$

$$\text{TX} = (1 / ((\ln / \text{B}) + (1 / \text{T0}))); \quad //\text{Temperature from thermistor}$$

$$\text{TX1} = (1 / ((\ln1 / \text{B}) + (1 / \text{T0})));$$

$$\text{TX2} = (1 / ((\ln2 / \text{B}) + (1 / \text{T0})));$$

$$\text{TX3} = (1 / ((\ln3 / \text{B}) + (1 / \text{T0})));$$

$$\text{TX4} = (1 / ((\ln4 / \text{B}) + (1 / \text{T0})));$$

$$t = t + 1;$$

$$\text{TX} = \text{TX} - 273.15; \quad //\text{Conversion to Celsius}$$

$$\text{TX1} = \text{TX1} - 273.15;$$

$$\text{TX2} = \text{TX2} - 273.15;$$

$$\text{TX3} = \text{TX3} - 273.15;$$

Annexe D

```
TX4 = TX4 - 273.15;
```

```
Serial.print (" Temperature: ");
```

```
Serial.print ("\t");
```

```
Serial.print (TX);
```

```
Serial.print ("C\t\t");
```

```
Serial.print (TX + 273.15);    //Conversion to Kelvin
```

```
Serial.print ("K\t\t");
```

```
Serial.print ((TX * 1.8) + 32); //Conversion to Fahrenheit
```

```
Serial.print ("F");
```

```
Serial.print ("\ \ time: ");
```

```
Serial.print ("\t\t");
```

```
Serial.print (TX1);
```

```
Serial.print ("\t\t");
```

```
Serial.print (TX2);
```

```
Serial.print ("\t\t");
```

```
Serial.print (TX3);
```

```
Serial.print ("\t\t");
```

```
Serial.print (TX4);
```

```
Serial.println ("\t");
```

```
Delay (2000);
```

```
}
```

La carte Arduino :

E.1 Partie matérielle :

Arduino, et son récent synonyme Genuino, est une marque qui couvre des cartes matériellement libres sur lesquelles se trouve un microcontrôleur d'architecture Atmel, Les schémas de ces cartes sont publiés en licence libre. Cependant, certains composants,

Arduino est une plate forme électronique open-source basé sur le matériel et le logiciel facile à utiliser. Les cartes Arduino sont capables de lire les entrées, la lumière sur un capteur, un doigt sur un bouton ou un et la transformer en une sortie - activation d'un moteur, d'allumer une LED, afficher une écriture. On peut commander la carte Arduino en envoyant un ensemble d'instructions au microcontrôleur disposé sur la carte. Pour ce fait, on utilise le langage de programmation Arduino (Basé sur le câblage) et le logiciel Arduino IDE (Integrated Development Environment) basé sur le traitement.

Au fil des années, Arduino a été le cerveau de milliers de projets, des objets de tous les jours à des instruments scientifiques complexes. Une communauté mondiale des décideurs, étudiants, amateurs, artistes, programmeurs et professionnels - sont rassemblés autour de cette plate - forme open source, leurs contributions ont ajouté une quantité incroyable de connaissances accessibles qui peuvent être d'une grande aide.

Toutes les cartes Arduino sont complètement open source, permettant aux utilisateurs de les construire de façon autonome et les adapter à leurs besoins particuliers.

Le logiciel IDE Arduino est aussi en open-source, et il se développe à travers les contributions des utilisateurs dans le monde entier.

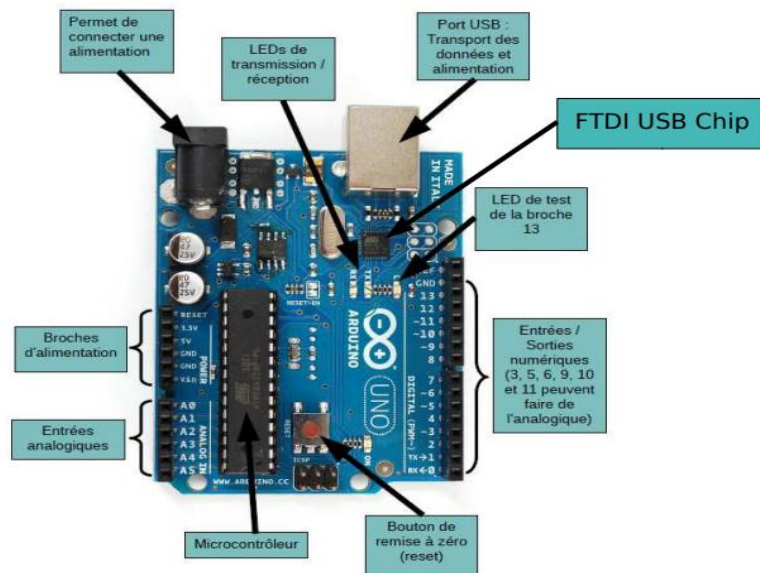


Figure E.1 Vue de la carte Arduino UNO.

Annexe E

Aujourd'hui, en soudant un grand nombre de composants encombrants; tels que les transistors; les résistances et les condensateurs tout peut être logé dans un petit boîtier en plastique noir muni d'un certain nombre de broches dont la programmation peut être réalisée en langage C.

Le microcontrôleur ATmega328 est constitué d'un ensemble d'éléments qui ont chacun une fonction bien déterminée. Il est en fait constitué des mêmes éléments que la carte mère d'un ordinateur. Globalement, l'architecture interne de ce circuit programmable est composée essentiellement de :

- Mémoire Flash : C'est celle qui contiendra le programme à exécuter. Cette mémoire effaçable et réinscriptible est une mémoire programmée de 32Ko.
- RAM : c'est la mémoire dite "vive", elle va contenir les variables du programme. Elle est dite "volatile" car elle s'efface si on coupe l'alimentation du microcontrôleur.
- EEPROM : C'est le disque dur du microcontrôleur. On y enregistre des infos qui ont besoin de survivre dans le temps, même si la carte doit être arrêtée. Cette mémoire ne s'efface pas lorsque l'on éteint le microcontrôleur ou lorsqu'on le reprogramme.

➤ Les sources d'alimentation de la carte :

La carte Arduino UNO, peut-être alimentée soit via la connexion USB (qui fournit 5V jusqu'à 500mA) ou à l'aide d'une alimentation externe. La source d'alimentation est sélectionnée automatiquement par la carte.

La carte peut fonctionner avec une alimentation externe de (6 à 20 volts). Cependant, si la carte est alimentée avec moins de (7V), la broche (5V) pourrait fournir moins de (5V) et la carte pourrait être instable. Si on utilise plus de (12V), le régulateur de tension de la carte pourrait chauffer et endommager la carte. Aussi, la plage idéale recommandée pour alimenter la carte Arduino UNO est entre (7V et 12V).

Les broches d'alimentation sont les suivantes :

- VIN : La tension d'entrée positive lorsque la carte Arduino est utilisée avec une source de tension externe (à distinguer du 5V de la connexion USB ou autre source 5V régulée), On peut alimenter la carte à l'aide de cette broche.
- 5V : La tension régulée utilisée pour faire fonctionner le microcontrôleur et les autres composants de la carte (pour info : les circuits électroniques numériques nécessitent une tension d'alimentation parfaitement stable dite "tension régulée" obtenue à l'aide d'un composant appelé un régulateur et qui est intégré à la carte Arduino).
- 3V3 : Une alimentation de 3.3V fournie par le circuit intégré FTDI (circuit intégré faisant

L'adaptation du signal entre le port USB de votre ordinateur et le port série de l'ATmega) de la carte est disponible, l'intensité maximale sur cette broche est de 50mA.

- GND : Broche de masse (Ou 0V).

➤ Les entrées ou sorties numériques:

Chacun des connecteurs D0 a D13 peut être configuré par programmation en entrée ou en sortie, nous pouvons donc avoir par exemple les connecteurs 2 et 3 configurés comme des entrées et les connecteurs 7, 8 et 9 configurés comme des sorties. Il est par conséquent possible de connecter côte à côte des capteurs logiques (Interrupteurs par exemple) aux connecteurs 2 et 3 et des actionneurs aux connecteurs 7, 8 et 9. Les signaux véhiculés par ces connecteurs sont des signaux logiques, c'est-à-dire qu'ils ne peuvent prendre que deux états : HAUT (5 Volts) ou BAS (0 Volt), par rapport au connecteur de masse GND, qui lui est toujours, par définition à 0 Volt.

➤ Les entrées analogiques :

Contrairement aux entrées/sorties numériques qui ne peuvent prendre que deux états HAUT et BAS, ces six entrées peuvent admettre un millier de valeurs (1024 exactement) analogiques comprises entre 0 et 5 Volts. Nous pourrions donc avoir des valeurs de tension précises à 5 mV près ($\approx 5V/1024$)

E.2 Partie logicielle :

L'interface IDE Arduino est plutôt simple, elle offre une interface minimale et épurée pour développer un programme sur les cartes Arduino. Elle est dotée d'un éditeur de code avec coloration syntaxique et d'une barre d'outils rapide. Ce sont les deux éléments les plus importants de l'interface, c'est ceux que l'on utilise le plus souvent. On retrouve aussi une barre de menus, plus classique qui est utilisée pour accéder aux fonctions avancées de l'IDE. Enfin, une console pour afficher les résultats de la compilation du code source, des opérations sur la carte, etc.

Le langage Arduino est inspiré de plusieurs langages. On retrouve notamment des similarités avec le C, le C++, le Java et le Processing. Le langage impose une structure particulière typique de l'informatique embarquée.

- La fonction « Setup » contiendra toutes les opérations nécessaires à la configuration de la carte (directions des entrées sorties, débits de communications série, etc.).

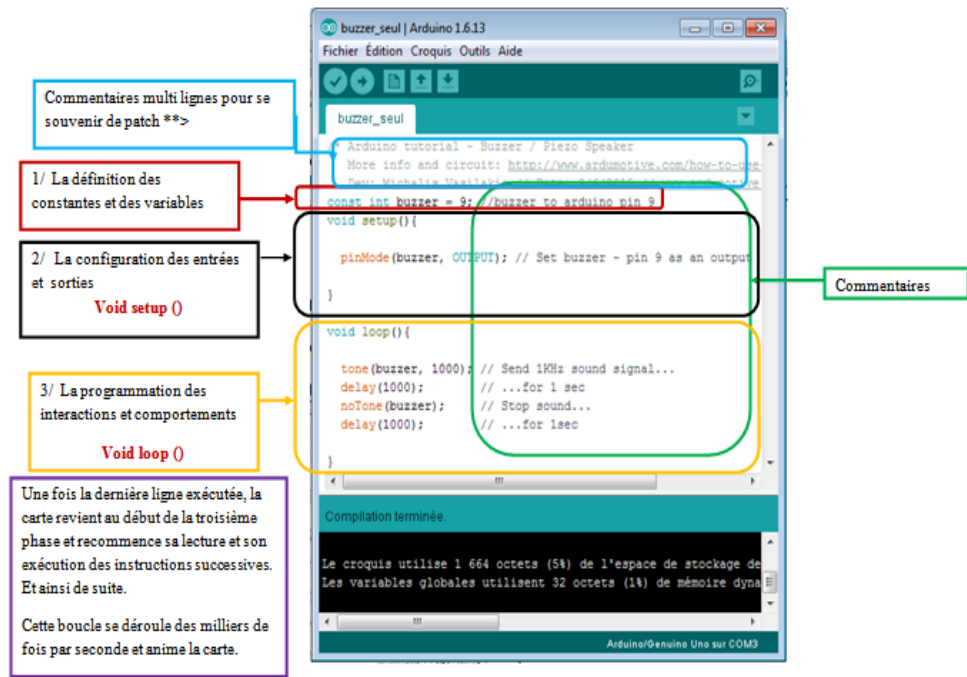


Figure E.3 Structure générale d'un programme sur l'IDE.