

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

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTÉ DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DÉPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Études de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences et Technologies**

Filière : **Électrotechnique**

Spécialité : **Machines Electriques**

Présenté par

Imane DEBBI
Aimad SELLAM

Thème

Impact du type d'enroulement sur l'échauffement d'un Moteur asynchrone avec un défaut de coupure d'une phase d'alimentation

Mémoire soutenu publiquement le 28 / 09 / 2024 devant le jury composé de :

M Youcef BOUTORA
Professeur, UMMTO, Président

M Rabah KHALDI
MAA, UMMTO, Encadrant

M Azzouz MIOUAT
MAA, UMMTO, Examineur

Remerciements

Tout d'abord, nous souhaitons exprimer notre gratitude envers « DIEU » le miséricordieux, le tout-puissant qui nous a apporté le courage et fourni les ressources requises pour mener à bien ce projet fin d'étude.

Nous exprimons notre profonde gratitude envers notre encadreur, Mr Khaldi Rabah, Maitre –assistant chargé de cours au département d'Electrotechnique de l'université Tizi-Ouzou pour le sujet, la confiance qu'il nous a accordée et le suivi constant tout au long de la réalisation de ce travail. Nous l'apprécions également pour nous avoir offert cette opportunité.

Nos grands remerciements aux membres de Jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail, ainsi qu'à tous les enseignants du département d'Electrotechnique pour nous avoir aidés.

Nous tenons également à remercier chaleureusement tous nos amis étudiants de la faculté de génie électrique, en particulier ceux de la promotion machine électrique.

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail

*A ma fabuleuse étoile ma très chère **mamanet mon père** qui ont consacré leur vie à ma réussite et qui ont illuminé mon chemin avec leurs conseils judicieux.*

*A mon cher et unique frère **Yacine**.*

*A ma sœur **Samia** et son mari **Sofiane**.*

*A mon petit neveu **Evan**.*

*A mes chères tantes **Halima** et **Djouher***

*A ma chère cousine **Katia**.*

A tous mes ami(e)s et enfin tous les étudiants de ma promotion.

*A mon binôme **Imad**.*

J'espère qu'un jour, je pourrai leurs rendre un peu de ce qu'ils ont fait pour moi. Que dieu leurs accorde bonheur, et une longue vie.

IMANE

DÉDICACES

A ma mère et mon père, pour l'éducation qu'ils m'ont prodigué avec tous les moyens et au prix de tous les sacrifices qu'ils ont consentis à mon égard, pour le sens du devoir qu'ils m'ont enseigné depuis mon enfance

A ma chère sœur

A tous mes amis et collègues que j'ai pu connaître depuis mon enfance

A tous les professeurs qui m'ont enseigné tout au long de mon parcours

A tous ceux qui m'aiment, A tous ceux que j'aime

A mon binôme Imane.

Je vous dédie ce modeste travail.

AIMAD

SOMMAIRE

Sommaire

Introduction générale.....1

Chapitre I : Généralités, Enroulements, pertes et défaut d'un moteur asynchrone à cage

I.1.Introduction.....	3
I.2.Généralités sur la machine asynchrone à cage.....	3
I.2.1.Définition.....	3
I.2.2.Constitution de la machine asynchrone à cage.....	4
I.2.2.1. Stator.....	5
I.2.2.2.Rotor.....	5
I.2.3.Principe de fonctionnement	6
I.2.3.1.Le champ tournant.....	7
I.2.3.2.La vitesse de synchronisme.....	7
I.2.3.3.Le glissement.....	8
I.2.3.4.Le couple.....	8
I.2.4.Le Bilan de puissance de la machine asynchrone à cage.....	8
I.2.4.1. Puissance absorbé.....	8
I.2.4.2.Puissance transmise au rotor.....	9
I.2.4.3.Puissance électromagnétique.....	9
I.2.4.4.Puissance mécanique.....	9
I.2.4.5.Puissance utile.....	10
I.2.4.6. rendement.....	10
I.2.4.7.Bilan énergétique d'un moteur asynchrone.....	10
I.2.5.Les performances de la machine asynchrone à cage.....	11
I.3.Enroulement dans les machine asynchrone à cage.....	11
I.3.1.Définition.....	11
I.3.2.Enroulement du stator.....	12
I.3.3.Enroulement du rotor.....	12

I.3.4.	Avantages.....	12
I.3.5.	Bobinage de la machine asynchrone	12
I.3.5.1.	Différents types d'enroulement.....	13
I.3.5.1.1.	Enroulement Imbriqué à une seule couche.....	13
I.3.5.1.2.	Enroulement Imbriqué à deux couches.....	14
I.3.5.1.3.	Enroulement concentrique.....	14
I.4	Les différentes pertes dans la machine asynchrone	15
I.4.1.	Pertes à vide.....	15
I.4.1.1.	pertes fer.....	15
I.4.1.2.	pertes par courants de Foucault.....	15
I.4.1.3.	Pertes Hystérésis.....	16
I.4.1.4.	Pertes mécaniques.....	16
I.4.2.	Pertes en charge.....	17
I.4.2.1.	Pertes Joule.....	17
I.4.2.2.	Pertes Joule statorique.....	17
I.4.2.3.	Pertes Joule rotorique.....	17
I.4.2.4.	Pertes supplémentaire.....	18
I.4.2.4.1.	Pertes dans le circuit électrique.....	18
I.4.2.4.2.	Pertes dues aux flux de fuite d'encoche.....	18
I.4.2.4.3.	Pertes dues aux flux de fuite de phase.....	18
I.5.	Les différents défauts de la machine asynchrone à cage.....	19
I.5.1.	Défauts internes et externes.....	19
I.5.2.	Etude statistique des défauts de la machine synchrone à cage.....	20
I.6.	Causes de défauts.....	21
I.6.1	Défauts statoriques.....	22
I.6.1.1.	Défauts d'isolant dans un.....	22

I.6.1.2.Court circuit entre spires.....	23
I.6.1.3.Court circuit entre phases.....	23
I.6.1.4.Défauts de circuit magnétique.....	24
I.6.2.Les défauts rotorique.....	25
I.6.2.1.L'excentricité.....	25
I.6.2.2.Défauts de rupture de barres et d'anneau de court circuit.....	26
I.6.2.3.Défauts de roulement.....	27
I.7.conclusion.....	28

Chapitre II : Mode de transfert de chaleur, Méthodes d'étude thermique et Moyens de mesure de température dans une machine électrique.

II.1.Introduction.....	29
II.2.Modes de transfert de chaleur.....	29
II.2.1.Transfert de chaleur par conduction.....	29
II.2.1.1.Conductivité thermique.....	30
II.2.1.2.Conductivité thermique des solides hétérogènes.....	30
1. Association parallèle.....	32
2. Association Série.....	32
II.2.2.Transfert de chaleur par convection.....	33
II.2.2.1.convection naturelle.....	34
II.2.2.2.Convection forcée.....	34
II.2.3.Transfert de chaleur par rayonnement.....	34
II.3.Echange thermique dans une machine électrique.....	35
II.3.1.Méthodes d'étude thermique.....	35
II.3.1.1.Méthode expérimentales.....	35
II.3.1.2.Méthodes calorimétrique.....	35
II.3.1.3.Mesure de la température par des capteurs.....	36
II.3.1.4.Mesure de la température par camera infrarouge.....	36
II.3.2.Méthode théorique.....	36

II.3.2.1.Méthode nodale.....	37
II.3.3.Méthode numérique.....	38
II.3.3.1.Méthodes des différences finies.....	39
II.3.3.2.Méthodes des éléments finis.....	39
II.4.Moyens de mesure de la température.....	39
II.4.1.Introduction.....	39
II.4.1.1 Méthode de mesure par contact direct.....	39
II.4.1.2.Méthode de mesure sans contact.....	39
II.4.1.3.Méthode de mesure mixte.....	39
II.4.2.Méthodes de mesure par contact direct.....	40
II.4.2.1.Les Thermocouples.....	40
II.4.2.1.1.Température de référence d'un thermocouple.....	41
II.4.2.1.2.Différents types de thermocouples.....	42
II.4.2.1.3.Avantages et les inconvénients des thermocouples.....	42
II.4.2.2.Les thermistances.....	43
II.4.2.2.1.Constitution et principe.....	43
a. Thermistance CTN.....	43
b. Thermistance CTP.....	44
II.4.2.2.2. Avantages et les inconvénients des thermistances.....	44
II.4.2.3.Comparaison entres les thermocouples et les thermistances.....	44
II.4.3.Méthode de mesure de la température sans contact.....	45
II.4.3.1.Bilan des avantages et inconvénients.....	45
II.4.3.2.Classification des méthodes de mesure de la température sans contact.....	46
1. Méthodes direct.....	46
2. Méthodes interrogatives.....	49
3. Caméra thermique.....	49
II.5.conclusion.....	50

Chapitre III : Modélisation thermique par éléments finis d'une machine asynchrone en présence d'un défaut de coupure d'une phase.

III.1.Introduction.....	51
III.2.Présentation du logiciel FEMM (Finit elementMéthodMagnetics).....	51
III.3.Utilisation du logiciel FEMM.....	52
III.4.La structure du modèle étudié.....	54
III.5.Evaluation des paramètres thermo-physiques.....	55
III.5.1.conductivité thermique.....	55
III.5.2.Densités de pertes.....	56
III.5.3 Maillage de la structure en une seule couche.....	57
III.6.Résultats de la simulation	58
III.6.1.Régime sain.....	58
III.6.1.1.Essai à vide.....	58
III.6.1.2.Essai en charge nominale.....	59
III.6.2.Régime de défaut de coupure d'une phase.....	59
III.6.2.1.Essai à vide.....	60
III.6.2.2.Essai en charge nominale.....	60
III.6.3.Interprétation des résultats.....	61
III.6.4.Analyse des résultats obtenus par la simulation	64
III.7.Le maillage de la structure en deux couches.....	66
III.8.Résultats de la simulation.....	67
III.8.1.Régime sain.....	67
III.8.1.1.Essai à vide.....	68
III.8.1.2.Essai en charge nominale.....	68
III.8.2.Régime de défaut de coupure d'une phase.....	68
III.8.2.1.Essai à vide.....	68
III.8.2.2.Essai en charge nominale.....	69

III.8.3.Interprétation des résultats	69
III.8.3.1.Analyse des résultats.....	69
III.8.4.Régime de surcharge.....	74
III.8.4.1.Régime sain.....	74
III.8.4.2.Régime de défaut.....	75
III.8.5.Interprétation des résultats obtenus par la simulation en régime de surcharge.....	75
III.9.Comparaison entres les résultats expérimentaux et celles de FEMM.....	76
III.10.Comparaison entres les résultats en une seule couche et en deux couches.....	76
Conclusion Générale.....	78

Bibliographie

Annexe

LISTE DES FIGURES

N° FIGURE	Le Titre	Page
(I-1)	La machine asynchrone	3
(I-2)	Les différents composants d'un moteur asynchrone	4
(I-3)	Les deux parties essentielles de la machine asynchrone	4
(I-4)	Stator Bobiné	5
(I-5)	Rotor à cage	6
(I-6)	Vue schématique en perspective du rotor	6
(I-7)	Le bilan énergétique des pertes et des puissances	10
(I-8)	Représentation des Enroulements d'une machine asynchrone triphasée	12
(I-9)	Groupes de bobines imbriquées	13
(I-10)	Développement panoramique d'un enroulement Imbriqué à double couches et 12 encoches	14
(I-11)	Développement panoramique d'un enroulement concentrique à 12 encoches	15
(I-12)	Cycle d'hystérésis	16
(I-13)	Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage	19
(I-14)	Causes internes de défauts	19
(I-15)	Evolutions statistiques des pannes dans la machine asynchrone à cage	21
(I-16)	Défaut d'un court-circuit entre spires	23
(I-17)	Défaut d'un court circuit entre phases	24
(I-18)	Défauts statoriques de la machine asynchrone	24
(I-19)	Types d'excentricité	26
(I-20)	Les défauts de roulement	27

(I-21)	Roulement à bille	28
(II-1)	Transmission de chaleur par conduction	30
(II-2)	Association parallèle	32
(II-3)	Association série	33
(II-4)	Dispositif de mesure calorimétrique	36
(II-5)	Découpage du moteur en 5 parties	38
(II-6)	Constitution du circuit thermocouple	40
(II-7)	Les deux types de thermistance	44
(II-8)	Principales méthodes de mesure de température sans contact	45
(II-9)	Pyromètre infrarouge	47
(II-10)	Pyromètre portable	48
(II.11)	Mise en scène des mesures de températures sans contact par des méthodes interrogatives	49
(II.12)	Photo d'une caméra thermique	50
(III.1)	Fenêtre du modèle étudié	53
(III.2)	Structure du modèle réalisé de la machine étudiée sur FEMM	54
(III.3)	Structure en une seule couche maillée d'une coupe radiale	58
(III.4)	Répartition de la température dans le moteur lors de l'essai à vide	58
(III.5)	Répartition de la température dans le moteur lors de l'essai en charge	59
(III.6)	Structure maillée d'une coupe radiale lors de défaut de coupure du phase	59
(III.7)	Répartition de la température dans l'essai à vide	60
(III.8)	Répartition de la température dans l'essai en charge	60
(III.9)	Température en fonction de la distance du centre du moteur qui passe par l'encoche à vide en régime sain	62
(III.10)	Température en fonction de la distance qui passe par l'encoche la moins chaude en régime de défaut de coupure d'une phase	62
(III.11)	Température en fonction de la distance qui passe par l'encoche	63

	la plus chaude à vide en régime de défaut	
(III.12)	Température en fonction de la distance du centre du moteur	63
(III.13)	Température en fonction de la distance du centre qui passe par l'encoche la moins chaude en charge nominale	64
(III.14)	Température en fonction de la distance du centre qui passe par l'encoche la plus chaude en charge en régime de défaut	64
(III.15)	Structure en deux couches maillée d'une coupe radiale	67
(III.16)	Répartition de la température à l'essai à vide sur une coupe radial à deux couches	67
(III.17)	Répartition de la température dans l'essai en charge sur coupe radial en deux couches	68
(III.18)	Répartition de la température dans l'essai à vide en présence du défaut sur une coupe radial à deux couches	68
(III.19)	Répartition de la température dans l'essai en charge en présence du défaut	69
(III.20)	Température en fonction de la distance du centre qui passe par l'encoche la moins chaude à vide en régime de défaut	71
(III.21)	Température en fonction de la distance qui passe par l'encoche la plus chaude à vide	71
(III.22)	Température en fonction de la distance du centre qui passe par l'encoche la moins chaude en charge	72
(III.23)	Température en fonction de la distance qui passe par l'encoche	72
(III.24)	Répartition de la température dans l'essai en surcharge en régime sain sur une coupe radiale en deux couches	74
(III.25)	Répartition de la température dans l'essai en surcharge en régime de défaut de coupure d'une phase sur une coupe radiale en deux couches	75

LISTE DES TABLEAUX

N TABLEAU	Le titre	Page
II.1	Analogie thermoélectrique	37
II.2	Résistance thermique pour différents modes de transfert de chaleur	37
II.3	Les différents types de thermocouples	42
II.4	Comparaison entre les thermocouples et thermistances	45
III.1	Conductivité thermique des différentes zones du modèle étudié	55
III.2	Densités de pertes des différents blocs du moteur en régime sain	56
III.3	Densités de pertes en régime de défaut à vide et en charge	56
III.4	Densités de pertes des différentes parties du moteur en régime de surcharge	57
III.5	Les différentes valeurs de la température pour le cas de fonctionnement	60
III.6	Les valeurs de température pour	70
III.7	Les valeurs de température à l'essai en surcharge	75
III.8	Comparaison entre les valeurs mesurées expérimentales et par FEMM à vide	76
III.9	Comparaison entre les valeurs mesurées expérimentales et par FEMM en charge	76

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction Générale

L'utilisation croissante des machines électriques à courant alternatif, en particulier des machines asynchrones dans divers secteurs industriels est principalement due à leur robustesse mécanique et à leur coût d'achat abordable.

Cette évolution a été rendue possible par les progrès dans le domaine de l'électronique de puissance et de la commande numérique [20].

Dans une machine asynchrone, la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique engendre divers types de pertes (Joule, hystérésis, courants de Foucault mécaniques) qui se traduisent par la production de chaleur à l'intérieur de la machine, La production et la dissipation de cette chaleur dépendent du mode de fonctionnement de la machine, du type d'alimentation électrique, des conditions environnementales et du système de refroidissement. En cas de conditions de fonctionnement sévères, ces échauffements excessifs peuvent conduire à une dégradation de l'isolation des conducteurs ainsi que des parties tournantes telles que (les roulements, les paliers...). Et particulièrement, lors d'apparition de défauts [19].

Notre travail vise à développer un modèle thermique pour un moteur asynchrone triphasé. Nous utilisons la méthode des éléments finis avec le logiciel FEMM pour étudier la distribution spatiale des températures. Nous examinons le fonctionnement sain du moteur à une seule couche ainsi que son comportement en cas de défaut (coupure d'une phase en couplage triangle). Ensuite nous répétons les mêmes étapes avec un moteur à deux couches.

Ce mémoire comprend cette introduction générale ainsi que trois chapitres qui se succèdent comme suit :

1. Dans le premier chapitre nous présentons un aperçu détaillé de la constitution du moteur asynchrone, en rappelant son principe de fonctionnement et en présentant le bilan de puissance ainsi que les différents types d'enroulements utilisés dans le stator de la machine asynchrone à cage d'écureuil. Nous examinons également les diverses pertes présentes dans un moteur asynchrone à cage, en énumérant les différents défauts qui peuvent affecter ces machines ainsi que leurs causes et conséquences.
2. Dans le deuxième chapitre, nous examinons les modes de transfert de chaleur, les méthodes d'étude thermique et les techniques de mesure de la température appliquées à une machine électrique.
3. Le troisième chapitre, traite du modèle thermique d'un moteur asynchrone à cage en utilisant la méthode des éléments finis sous l'environnement FEMM (Finite Element method magnetics), en analysant à la fois le fonctionnement du moteur avec un enroulement à une seule couche en régime sain et en cas de défaut , puis nous

comparons les résultats obtenus à la fois avec le fonctionnement du moteur avec un enroulement à deux couches en régime sain et en cas de défaut, puis nous comparons les résultats obtenus.

Cela est fait pour différents régime de charge (à vide, en charge nominale et en surcharge).

Ce travail se termine par une comparaison des résultats obtenus pour un moteur avec un enroulement à deux couches et une seule couche.

Enfin nous donnons une conclusion générale dans laquelle on résume les principaux résultats obtenus, suivi de perspectives pour des travaux future.

CHAPITRE I

**Généralités, Enroulements, Pertes et défauts d'un
moteur asynchrone a cage**

I.1. Introduction

Les moteurs asynchrones à cage, également connus sous le nom de moteurs à induction, sont parmi les types de moteurs électriques les plus largement utilisés dans diverses applications industrielles, commerciales et résidentielles. Leur popularité découle de leur simplicité de construction, de leur fiabilité et de leur robustesse, ainsi que de leur coût relativement bas. Ces moteurs fonctionnent sur le principe de l'induction électromagnétique, où le courant alternatif alimenté dans le stator génère un champ magnétique tournant, induisant ainsi un courant dans le rotor pour produire un couple moteur. Cependant, malgré leurs nombreux avantages, les moteurs asynchrones à cage sont sujets à divers défauts et inefficacités qui peuvent affecter leurs performances, leur durabilité et leur sécurité. Dans ce chapitre, nous examinerons en détail les généralités concernant le fonctionnement des moteurs asynchrones à cage, ainsi que les défauts les plus courants auxquels ils peuvent être confrontés, ainsi que leurs causes, leurs effets et les méthodes de détection et de correction correspondantes.

I.2. Généralités sur la machine asynchrone

I.2.1. Définition

La machine asynchrone figure I.1 est connu également sous le terme de machine à induction. Cette dernière repose sur l'utilisation d'un champ magnétique tournant à deux armatures cylindriques concentriques, produit par des tensions alternatives, dont l'énergie peut être transférée par deux éléments principaux, la partie fixe appelé « stator » vers la partie mobile appelé « rotor » ou inversement par induction magnétique [1].

Le terme Asynchrone signifie que le Rotor ne tourne pas à la même vitesse que le champ magnétique statorique

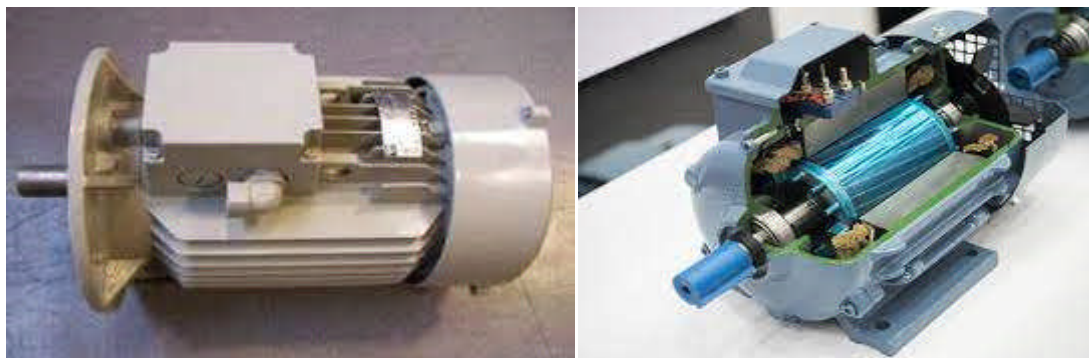


Figure (I-1): Photos d'une machine asynchrone

I.2.2. Constitution de la machine asynchrone à cage

La Figure (I.2) ci-dessous montre les différents composants du moteur asynchrone à cage :

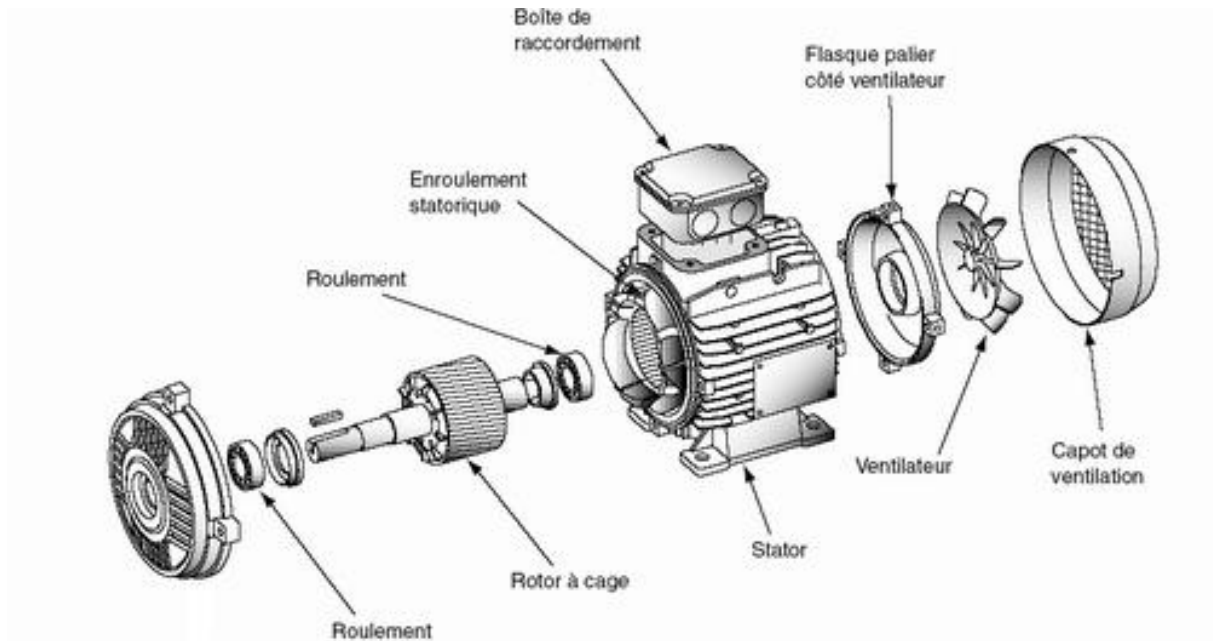


Figure (I-2) : Les différents composants d'un moteur asynchrone à cage [1]

La machine asynchrone comprend essentiellement deux parties figure (I.3) :

- une partie fixe (stator)
- une partie mobile (rotor)



Figure (I-3) : Les deux parties essentielles de la machine asynchrone

I.2.2.1. Stator

Le stator d'un moteur asynchrone est la partie fixe ou immobile que dite aussi inducteur, qui est formé principalement par [2], figure (I.4) :

- La carcasse,

- Des paliers,
- Des flasques,
- Le capot protégeant le ventilateur.



Figure (I-4): Stator bobiné

I.2.2.2. Rotor

Le rotor est la partie mobile de la machine, il est de forme cylindrique séparé du stator par un entrefer d'épaisseur constante, il existe deux types de rotor : le rotor à cage d'écureuil et le rotor bobiné [2].

Dans notre cas on s'intéresse au rotor à cage d'écureuil.

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (figure I.5) et (Figure I.6). Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques de tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

Dans le cas de rotor à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre formées et frettées dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre. Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire, de ce fait, son prix de revient est inférieur. De plus, il dispose d'une grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service.

Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple.)

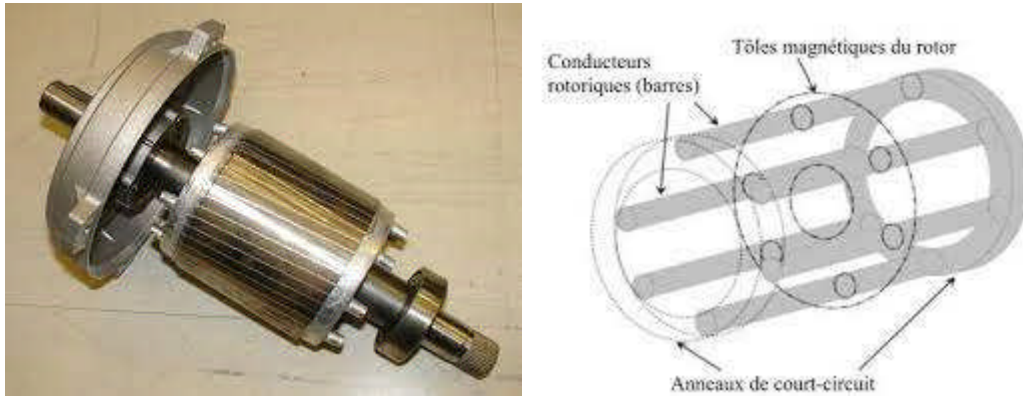


Figure (I-5) : Rotor à cage Figure (I-6) : Vue schématique en perspective du rotor

I.2.3. Principe defonctionnement :

Le fonctionnement d'une machine asynchrone triphasé à cage est basé sur trois principes de l'électrotechnique :

- Principe 1 : création d'un champ magnétique par un courant et qui se définit par la loi d'Ampère.
- Principe 2 : Force exercée sur un fil parcouru par un courant placé dans un champ magnétique et il est définit par la loi de Laplace.
- Principe 3 : déplacement d'un conducteur dans un champ magnétique, induction d'une tension et qui est définit par la loi de l'induction électromagnétique de Faraday.

Ce qui permet au rotor de tourner c'est le principe des champs magnétique tournant produit par des tensions alternatives. Trois enroulements sont disposés dans le stator à 120° électrique les uns des autres, une fois alimentés trois champs magnétiques indépendants sont créés. Ces champs magnétiques sont diphasés dans le temps par la même nature du courant triphasé. La vitesse du champ magnétique sera toujours supérieure à celle du rotor, les deux vitesses ne peuvent être synchrones d'où le nom de moteur asynchrone.

La vitesse d'un moteur en tours par minutes dépend de la fréquence du réseau d'alimentation et le nombre de pole du moteur donc pour faire varier la vitesse d'un moteur il suffit de modifier la fréquence ou le nombre de pole.

I.2.3.1. Le champ tournant

C'est la variation du flux magnétique crée par les courants statoriques. Sa fréquence de rotation est imposée par la fréquence des courants statorique. C'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique. La vitesse de ce champ tournant et appelée vitesse de synchronisme angulaire Ω_s [rad/s][1].

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (\text{I.1})$$

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

Avec :

Ω_s : vitesse angulaire de synchronisme en [rad /s]

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

p : Le nombre de paires de pôles

N_s : vitesse de synchronisme en [tr/min]

1.2.3.2. La vitesse de synchronisme

Sur les machines asynchrones, la vitesse de synchronisme dépend de la fréquence de la source et du nombre de pole de la machine [2].

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

Avec :

f : fréquence de la source d'alimentation [Hz]

1.2.3.3. Le glissement

Le glissement qu'on note « g » est le rapport entre la vitesse du glissement « $N_s - N$ » du rotor par rapport au champ tournant du stator à la vitesse du synchronisme N_s [3].

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

Avec :

g : Le glissement

N : La vitesse de rotation [tr/min]

I.2.3.4. Le couple

On appelle le couple électromagnétique la résultante de l'interaction des deux flux rotoriques et statoriques. La conversion d'énergie électrique en régime mécanique permet de développer un couple utile sur l'arbre du moteur.

On étudie le principe de l'obtention d'un couple par interaction du champ magnétique et par effet reculant, ces deux phénomènes découlent de l'étude de l'induction dans l'entrefer du moteur.

$$C_u = \frac{p_u}{\Omega} \quad (\text{I.5})$$

Avec :

C_u : le couple utile [N.m]

p_u : la puissance utile [w]

Ω : la vitesse de rotation [rd/s]

I.2.4. Le Bilan de puissance de la machine asynchrone à cage [3]

.2.4.1. Puissance absorbée

Il s'agit de l'énergie électrique fournie par le réseau nécessaire pour alimenter la machine électrique elle est donnée sous cette relation :

$$P_a = \sqrt{3} UI \cos \varphi \quad (\text{I.6})$$

Avec :

$U = V\sqrt{3}$: Tension composée entre phases (V)

V : Tension simple aux bornes d'un enroulement (V)

$I = J\sqrt{3}$: courant de ligne (A)

J : courant dans un enroulement (A)

$\cos\varphi$: facteur de puissance

I.2.4.2. Puissance transmise au rotor :

C'est la puissance absorbée par le rotor à travers l'entrefer, cette puissance est utilisée pour induire un champ magnétique dans le rotor et produire un couple électromagnétique nécessaire pour mettre en mouvement le rotor sa relation est comme suit :

$$P_{tr} = P_a - P_{Js} - P_{fs} \quad (W) \quad (I.7)$$

Avec :

P_a : la puissance absorbée

P_{Js} : Perte Joule statorique

P_{fs} : Perte fer statoriques (pertes magnétiques)

I.2.4.3. Puissance électromagnétique :

La puissance électromagnétique est la puissance produite par le champ magnétique induit dans le stator et agissant sur le rotor pour induire un mouvement dans la machine elle correspond à la puissance transmise au rotor :

$$P_{em} = P_{tr} \quad (W) \quad (I.8)$$

I.2.4.4. La puissance mécanique :

C'est la puissance développer par le rotor est égale a la puissance électromécanique transmise au rotor en lui soustraire les pertes fer et les pertes joule rotorique, son expression est donné par [3] :

$$P_m = P_{em} - P_{fr} - P_{Jr} \quad [W] \quad (1.9)$$

Avec :

P_{Jr} : PertesJoules rotoriques [W]

P_{fr} : Pertes fer rotoriques [W]

I.2.4.5. La puissance utile :

Son expression est donnée par :

$$P_u = P_m - P_{mec} \quad [W] \quad (I.10)$$

Avec :

P_u : Puissance utile [W]

P_{mec} : Pertes mécaniques [W]

I.2.4.6. Le rendement :

Le rendement de la machine asynchrone est égal au rapport entre la puissance utile et la puissance absorbées et valeur doit être comprise entre 0 et 1 son expression est donné par :

$$n = \frac{\text{puissance utile Fournie}}{\text{Puissance électrique absorbée}} = \frac{P_u}{P_a} \quad (\text{I.11})$$

Dans les moteurs asynchrones toujours le rendement est inférieur à 1-g, c'est pour cela qu'ils fonctionnent à faible glissement.

1.2.4.7. Bilan énergétique d'un moteur asynchrone

Le schéma de la Figure (I.7) représente les différentes pertes et puissances d'un moteur asynchrone :

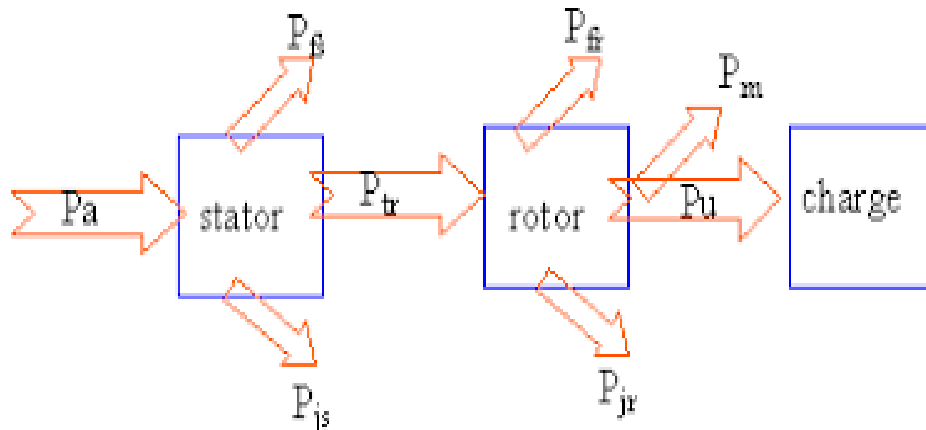


Figure (I-7) : Le Bilan énergétique d'un moteur asynchrone.

1.2.5. Les performances d'un moteur asynchrone

Les performances d'un moteur asynchrone sont essentielles dans de nombreux contextes industriels, voici quelques aspects clés des performances d'un moteur asynchrone [2] :

1. **Efficacité énergétique** : les moteurs asynchrones modernes sont conçus pour être économes en énergie. Ils convertissent l'énergie électrique en mouvement mécanique avec un rendement élevé, ce qui réduit la consommation d'énergie et les coûts associés.
2. **Taille et puissance** : plus la machine est grande et plus sa puissance est élevée, plus son coût initial sera élevé.
3. **Caractéristiques spécifiques** : le prix peut varier en fonction de la classe d'efficacité énergétique, du matériau de construction, de la tension d'alimentation et des dispositifs de démarrage ou de contrôle supplémentaires.
4. **Coûts d'installation** : incluent la main-d'œuvre pour l'installation physique, les coûts de mise en service et les adaptations éventuelles de l'infrastructure existante.

- 5. Coûts d'exploitation et de maintenance :** comprennent les dépenses liées à l'énergie pour faire fonctionner la machine, ainsi que les frais de maintenance préventive et corrective.

I.3. Enroulements dans la machine asynchrone à cage

I.3.1. Définition :

Le stator de la machine asynchrone est constitué de trois enroulements répartis dans l'espace et séparés d'un angle électrique de $2\pi/3$ radians. Le rotor qu'il soit à cage d'écureuil ou bobiné, est aussi formé de trois enroulements, car un système de courant triphasé symétrique s'établit lors d'un fonctionnement en régime permanent. La figure (I-8) présente la schématisation des enroulements du stator et du rotor [5]

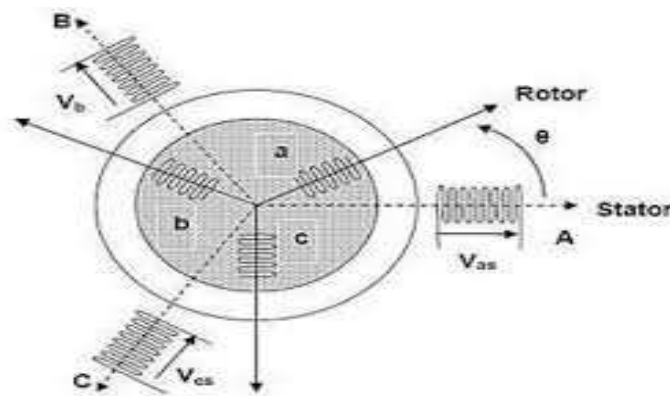


Figure (I-8) : Représentation des Enroulements d'une machine asynchrone triphasée.

Dans la machine asynchrone, il existe principalement deux Enroulements :

I.3.2. Enroulement du stator :

- Le stator est généralement équipé de bobines en cuivre enrobées dans les encoches du stator. Ces bobines sont alimentées en courant alternatif, ce qui crée un champ magnétique tournant à vitesse synchronique.
- Le nombre de phase dépend de la conception de la machine, mais la plupart des machines asynchrones, utilisent des enroulements triphasés.
- Les enroulements statoriques produisent un champ magnétique tournant qui interagit avec le rotor pour induire un courant et générer du couple, ce qui entraîne le mouvement de la machine.

I.3.3. Enroulement du rotor (à cage d'écureuil) :

Dans une machine asynchrone à cage, le rotor comporte un enroulement en forme de cage d'écureuil. Cet enroulement est généralement constitué de barres de cuivre ou d'aluminium. Ces barres sont disposées radialement autour du rotor et sont reliées à des anneaux conducteurs aux extrémités, formant ainsi une structure en forme de cage d'écureuil.

I.3.4. Avantages

- Fiabilité : l'enroulement à cage est robuste et ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui le rend fiable.
- Faible coût : la fabrication de l'enroulement à cage est relativement simple, ce qui le rend économique par rapport à d'autres types d'enroulements.

I.3.5. Bobinage de la machine asynchrone à cage

Le bobinage des machines asynchrone à cage, également connue sous le nom de rotor en cage d'écureuil, est assez différent de celui des moteurs asynchrones à bagues.

Dans les moteurs asynchrones à cage, le rotor est constitué de barres conductrices courtes et robustes, généralement en aluminium ou en cuivre, formant une structure en forme de cage d'écureuil. Le bobinage de ce type de rotor est donc intrinsèque à sa structure même.

Les moteurs à cage n'ont pas de bobinages distincts dans le rotor. Au lieu de cela, les barres conductrices du rotor sont solidement fixées dans les rainures du rotor et sont connectées à des anneaux conducteurs à chaque extrémité.

Le stator contient les enroulements essentiels pour créer le champ magnétique rotatif nécessaires pour le fonctionnement du moteur [7].

Les enroulements les plus utilisés dans le stator de la machine asynchrone à cage d'écureuil sont les enroulements imbriqués, et les enroulements concentriques.

I.3.5.1. Les différents types d'enroulements [1],[7]

Dans la machine asynchrone, il existe principalement deux types d'enroulements :

I.3.5.1.1. Enroulement Imbriqué à une seule couche :

Dans ce type d'enroulement, chaque bobine occupe deux encoches adjacentes sur le stator. Les conducteurs de chaque phase sont imbriqués les uns dans les autres, ce qui permet une distribution uniforme du champ magnétique dans le stator.

Ce type d'enroulement est largement utilisé dans les moteurs de moyenne et grande taille.

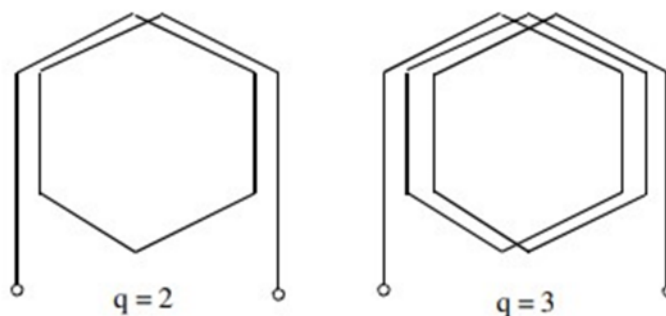


Figure (I-9) : Groupes de bobines imbriqués

q - le nombre d'encoches par pôle et par phase : $q = \frac{Z}{2pm}$

m - le nombre de phase

Z - le nombre d'encoches ;

$2p$ - le nombre de pôles. En plus de la vitesse du champ tournant, le nombre $2p$ indique le nombre de groupes de bobines dans une phase à l'exception de l'enroulement à une couche par pôle conséquent où celui-ci est égal à p .

Si q est entier l'enroulement est dit régulier.

Si q est fractionnaire l'enroulement est dit irrégulier (ou fractionnaire).

La caractéristique essentielle de tout enroulement à courant alternatif est le nombre d'encoches qu'occupe une phase sous chaque pôle. Celui-ci détermine le nombre de bobines dans un groupe.

1.3.5.1.2. Enroulement Imbriqué à deux couches :

Un Enroulement imbriqué à deux couches dans une machine à courant alternatif permet d'optimiser l'utilisation de l'espace dans le stator, d'améliorer la répartition du champ magnétique et de fournir une puissance et une densité de courant plus élevées par rapport aux enroulements à une seule couche.

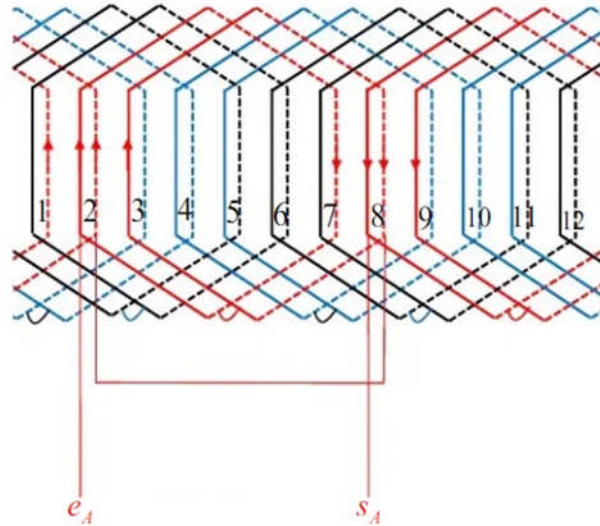


Figure (I-10) : Développement panoramique d'un enroulement imbriqué à double couches et 12 encoches

1.3.5.1.3. Enroulement concentrique :

Dans un enroulement concentrique, les conducteurs de chaque phase sont enroulés concentriquement autour du stator. Cela signifie que les bobines pour chaque phase sont enroulées les unes à côté des autres dans une seule couche autour du stator .et chaque bobine occupe une position concentrique par rapport au centre du stator.

Ce type de d'enroulement est généralement utilisé dans les moteurs de petite taille, ou l'espace est limité et une construction compacte est nécessaire

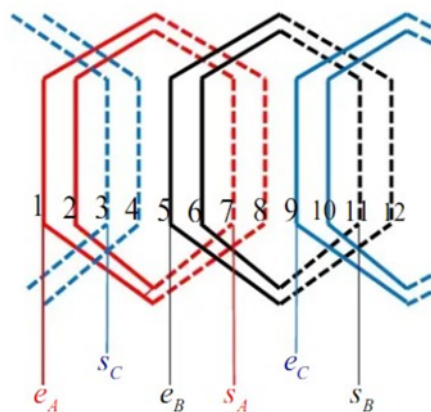


Figure (I-11) : Développement panoramique d'un enroulement concentrique à 12 encoches

I.4. Les différentes pertes dans la machine asynchrone à cage [4] [6] :

I.4.1. Pertes à vide

I.4.1.1. Les pertes Fer

Les pertes fer dans un moteur asynchrone sont influencées par le flux magnétique et ne dépendent que de la tension d'alimentation et de la fréquence des courants statoriques.

En régime de fonctionnement, ces grandeurs restent constantes, ce qui rend les pertes fer également constantes, quel que soit le niveau de charge du moteur.

En pratique, les pertes fer sont mesurées lors d'un essai à vide, généralement simultanément avec les pertes rotationnelles.

Elles sont constituées de deux types des pertes dans la machine asynchrone :

- Les pertes par courants de Foucault.

- Les pertes par Hystérésis.

I.4.1.2. Les pertes par courants de Foucault

Ce sont les pertes engendrées par la circulation des courants induits (courants de Foucault) dans la masse du métal, résultant de la variation du champ magnétique. Ces pertes sont proportionnelles au carré de la fréquence et de l'amplitude du champ magnétique.

Ce phénomène a été découvert par le physicien Français Léon Foucault en 1851 [5].

On peut calculer les pertes par effet de Foucault en utilisant l'expression suivante :

$$P_{Fc} = K_f (e \cdot f \cdot B_{max})^2 \quad (I.12)$$

Avec :

P_{Fc} : Pertes fer par courants de Foucault (W/kg)

K_f : Coefficient caractéristique de la tôle.

B_{max} : Induction maximale à la fréquence f (T)

e : épaisseur de la tôle (m)

f : la fréquence de la source (Hertz)

I.4.1.3. Les pertes par Hystérésis

Les pertes par Hystérésis, provenant du retard d'aimantation et de désaimantation d'un métal, se produisent lorsqu'un matériau magnétique subit un cycle d'hystérésis Figure (I.12) sous une excitation magnétique, générant des pertes d'énergie dans le noyau sous forme de chaleur. Ces pertes sont proportionnelles à la fréquence d'opération et à la surface du cycle d'hystérésis [4].

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{hys} = K_h \cdot f \cdot B_{max}^2 \quad (I.13)$$

Avec :

P_{hys} : Puissance perdue par hystérésis (W/kg)

K_h : Coefficient des pertes par hystérésis

B_{max} : Induction maximale à la fréquence f (T)

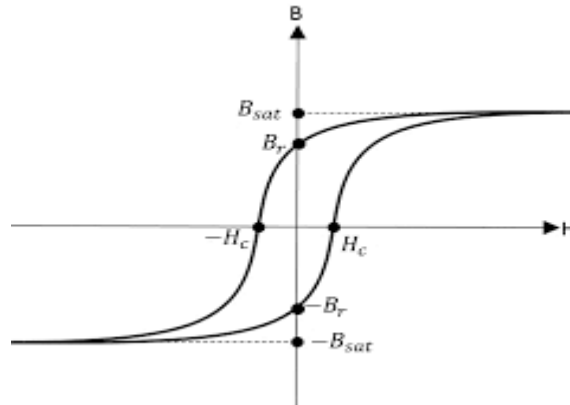


Figure (I-12) : Cycle d'hystérésis

I.4.1.4. Pertes mécaniques :

Ces pertes sont causées par différents facteurs, notamment les frottements des supports ou des enroulements à billes lors du déplacement des parties mobiles, ainsi que les frottements de l'air sur le rotor et la ventilation. [3]

On peut exprimer les pertes mécaniques par la relation suivante :

$$P_{mec} = k_t(n_1/10)^2 (D1ext \cdot 10^{-3})^4 [W] \quad (I.14)$$

Avec :

P_{mec} : Puissance mécanique (W)

n_1 : Vitesse de rotation synchrone (tr/min)

k_t : Facteur de majoration, il est donné en fonction du nombre de pair de pôle et du diamètre extérieur du rotor

$D1ext$: Diamètre extérieur du stator (m).

I.4.2. Pertes en charge

I.4.2.1. Pertes Joule

Elles représentent les pertes Joule dans les enroulements du stator et du rotor. Elles sont proportionnelles au carré du courant qui traverse ces enroulements

I.4.2.2. Pertes Joule statorique

Elles sont données par :

$$P_{Js} = 3R_s I_s^2 \text{ [W]} \quad (\text{I.15})$$

Avec :

R_s : Résistance d'une phase statorique

I_s : Courant dans une phase statorique (simple)

I.4.2.3. Pertes Joule rotorique :

Ce sont les pertes dissipées dans l'enroulement rotorique. Elles sont en fonction de la puissance transmise au rotor et au glissement, ces pertes sont calculées avec la relation suivante :

$$P_{Jr} = g \cdot P_{tr} \text{ [W]} \quad (\text{I.16})$$

Avec :

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

g : Le glissement

I.4.2.4. Les Pertes supplémentaires :

Les pertes supplémentaires, comme leur nom l'indique, s'ajoutent aux pertes fondamentales de la machine. Elles sont influencées par plusieurs facteurs, notamment la forme et la taille du conducteur, la variation du champ magnétique dans l'espace de l'encoche, en particulier le flux de fuite, ainsi que la fréquence de fonctionnement de la machine. Ces pertes peuvent être dues à des effets tels que l'effet de peau, l'effet de proximité et d'autres phénomènes liés à la géométrie et aux caractéristiques de la machine [6], [4].

I.4.2.4.1 Les pertes dans le circuit électrique :

Ces pertes sont générées dans les encoches de la machine et peuvent modifier la densité du courant en charge, en créant des courants de Foucault. Cela entraîne une augmentation des

pertes par effet joule en raison de l'augmentation de la résistance résultant de ces courants induits.

I.4.2.4.2. Les pertes dues au flux de fuite d'encoche :

Cette partie des pertes supplémentaires apparaît principalement suite à l'augmentation de la résistance des conducteurs due à l'effet de peau, en d'autres termes, elle résulte de la concentration du courant dans les parties superficielles ou périphériques des conducteurs.

I.4.2.4.3. Les Pertes dues au flux de fuite de phase :

Lorsque le nombre de phase est fini. Entraîne une distribution non sinusoïdale de la force magnétomotrice (FMM) dans l'entrefer. Un flux de fuite de phase apparaît et engendre des pertes non négligeables.

I.5. Les différents Défauts de la machine asynchrone à cage

Nous rappelons brièvement les différents défauts de la machine asynchrone triphasée à cage ainsi que leurs origines sans pour autant prétendre à l'exhaustivité. Ces défauts apparaissent dans les différentes parties constituant la machine [5].

I.5.1. Défauts internes et externes

Il existe deux catégories principales de défauts : internes et externes. Les causes de ces défauts sont succinctement et respectivement décrites dans les organigrammes des Figures (I.13) et (I.14).

Nous pouvons observer que les défauts internes de la machine sont causés par les composants internes de la machine tels que les circuits magnétiques rotorique et statorique, les bobinages statoriques, l'entrefer mécanique, la cage rotorique, etc., tandis que les défauts externes sont provoqués soit par les tensions d'alimentation et la charge mécanique, soit par l'environnement d'utilisation de la machine.

Selon les organigrammes des Figures (I.13) et (I.14), les origines des défauts sont diverses : thermiques, mécaniques, électriques ou encore environnementales. À titre d'exemple, les démarrages fréquents entraînent des courants élevés dans les barres rotoriques.

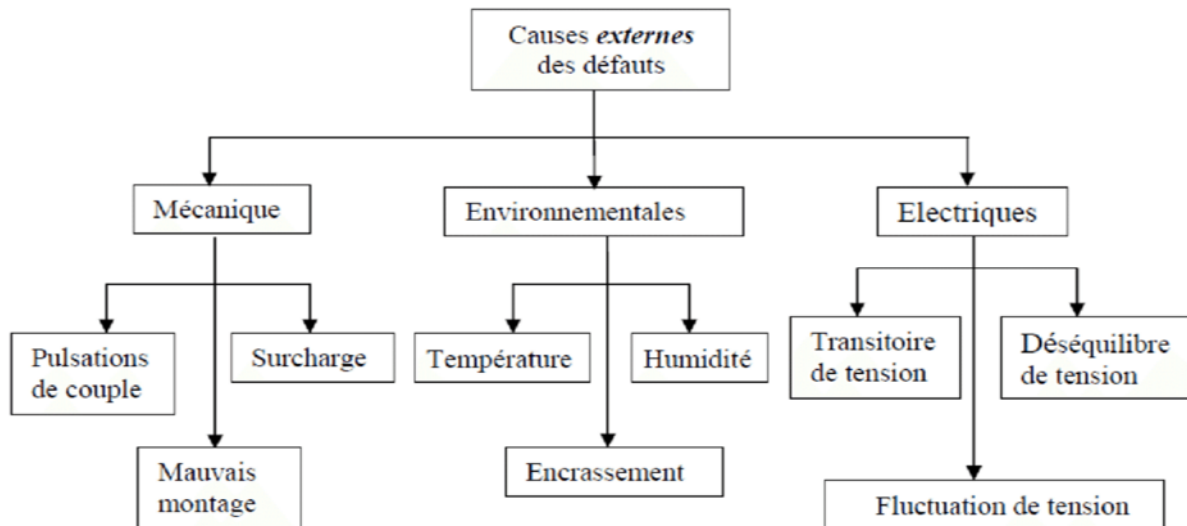


Figure (I-13) : Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage [5]

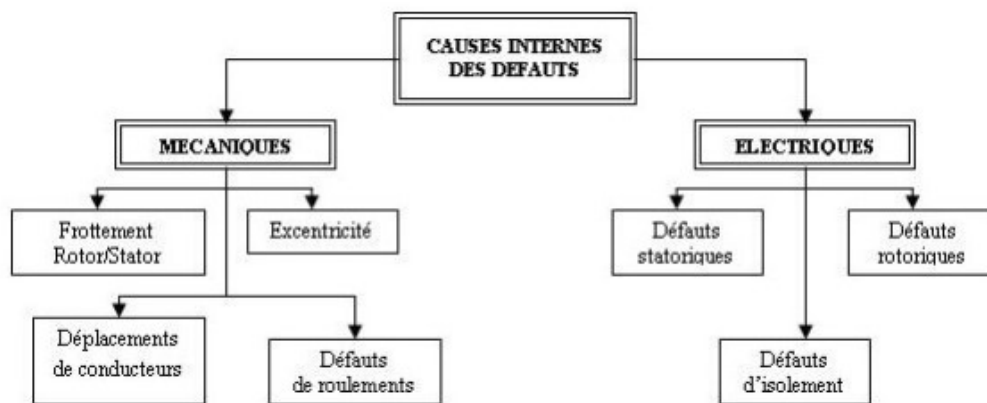


Figure (I-14) : Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage [5]

Les divers types de défauts rencontrés dans les machines tournantes ont leurs conséquences. Ainsi, Les surchauffèrent et les contraintes mécaniques peuvent conduire à des fissures et à la rupture des barres du rotor, ce qui, par un effet d'avalanche, peut entraîner la destruction totale du rotor.

Les vibrations mécaniques causées par les efforts électrodynamiques peuvent endommager l'isolation des conducteurs.

Les fronts de tensions générés par les convertisseurs statiques peuvent accentuer les décharges partielles et réduire la durée de vie de l'isolant.

Sur le plan environnemental, l'humidité et les produits corrosifs sont des facteurs courants.

Les défauts au niveau de l'entrefer se traduisent par une excentricité statique, dynamique ou mixte, causée par un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator ou par une déformation des cylindres rotorique ou statorique.

Au niveau de la cage, les défauts incluent la rupture de barres ou d'anneaux de court-circuit, souvent causée par une surcharge mécanique, un échauffement excessif ou un défaut de fabrication.

Les défauts des paliers comprennent le décentrage des flasques, entraînant généralement une excentricité statique, et la détérioration des roulements à billes, provoquant généralement une excentricité dynamique.

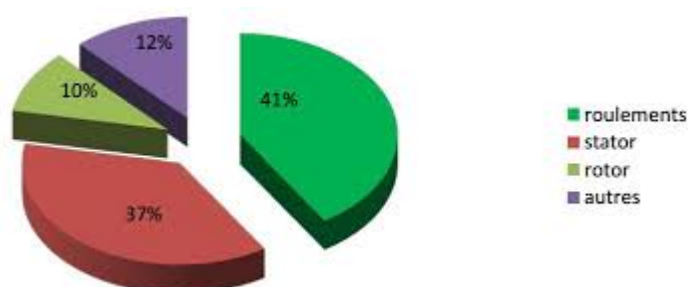
Des études statistiques ont été menées pour quantifier l'impact de chaque type de défaut sur la fiabilité de la machine, mais les résultats varient d'une étude à l'autre. Cependant, les défauts de paliers sont généralement classés comme les plus fréquents, suivis des défauts statoriques, puis des défauts de la cage rotorique [5].

I.5.2. Etude statistique des Défauts de la machine asynchrone

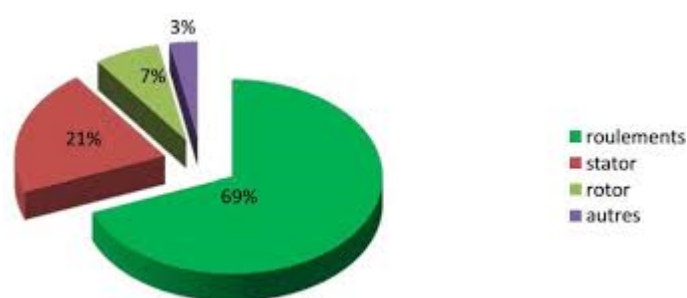
De multiples défaillances peuvent apparaître dans la machine asynchrone. Elles peuvent être prévisibles ou intempestives, mécaniques ou électriques. Leurs causes sont très variées. Plusieurs études ont été effectuées sur la fiabilité des machines électriques réalisées par différents groupes industriels [5]

La Figure (I.15) récapitule la distribution des défauts dans les moteurs examinés dans les études. Par exemple il a été constaté que dans les machines asynchrones à cage, les défauts rotoriques sont plus élevés que les défauts statoriques.

Parmi ces études réalisées par W.T. THOMSON en 1999, la répartition des défaillances était comme suit : les roulements (41%), le stator (37%), le rotor (10%) et les autres pannes (12%). Après une décennie, une autre étude est menée par A.H. BONNETT a montré que : les enroulements (69%), le stator (21%), le rotor (7%) et les autres pannes (3%)



a) Thomson 1999



b) Bonnett 2008

Figure (I-15) : Evolution des statistiques des pannes dans la machine asynchrone à cage, a) Thomson 1999, b) Bonnet 2008

I.6. Les causes des défauts

Pour le stator, les effets sont principalement dus à un problème [15]:

- thermique (surcharge),
- électrique (diélectrique),
- environnemental (agression).

Pour le rotor, les effets sont essentiellement dus à un problème :

- thermique (surcharge),
- résiduel (déformation),
- dynamique (arbre de transmission),
- mécanique (roulement),
- environnemental (agression).

I.6.1. Les défauts statoriques

La majeure partie de défauts statoriques est attribuée à la dégradation d'isolants qui se manifestent sous la forme d'un court-circuit entre spires, d'un court-circuit entre deux phases ou d'un court-circuit entre une phase et la carcasse. L'enroulement statorique d'une machine électrique est soumis à des efforts induits par une variété de facteurs, parmi les plus importants, une surcharge thermique, les vibrations mécaniques, les pics de tension provoqués par le réglage de fréquence, etc. Les causes les plus fréquentes des défauts d'enroulements statoriques sont [9] :

- Vieillesse naturelle des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation normale, l'isolant finit naturellement par se dégrader.
- Échauffement excessif du noyau et des enroulements du stator.

- Fissures dans la tôle, de fixation, et des jonctions.
- Mauvaise connexion des têtes des enroulements.
- Fonctionnement dans un environnement sévère, contamination provoquée par l'humidité et la saleté.
- Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge.
- Décharges électriques.
- Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- Fuites dans les systèmes de refroidissement.

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit :

I.6.1.1. Défauts d'isolant dans un enroulement :

La dégradation des matériaux isolants utilisés dans les enroulements peut conduire à des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (telles que les pertes Joule, fer, mécaniques, etc.) entraînent une élévation de la température des divers composants du moteur. Or, les matériaux isolants ont des limites en termes de résistance mécanique, de température et de tension. Lorsque ces limites sont dépassées, un court-circuit peut survenir dans l'enroulement concerné.

Si le défaut d'isolation se produit sur une seule spire, le courant de défaut circule entre le fil de cuivre de cette spire et la tôle du stator, ce qui est appelé un défaut phase-masse. Il peut également circuler entre deux spires d'une même phase si l'isolant qui les sépare est endommagé, ce qui constitue un défaut entre-spires. Dans le cas des bobinages à deux couches, une même encoche peut contenir des conducteurs de deux phases différentes.

Si les isolants de ces deux bobines se détériorent simultanément dans une même zone, cela peut créer un contact électrique entre deux spires de phases différentes, ce qui est appelé un défaut phase-phase. Ce type de défaut peut également se produire dans les bobinages à une seule couche au niveau des têtes de bobines, où les conducteurs de deux phases différentes peuvent entrer en contact.

I.6.1.2. Court-circuit entre spires

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau

du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2^{ème} court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut [17], [13].

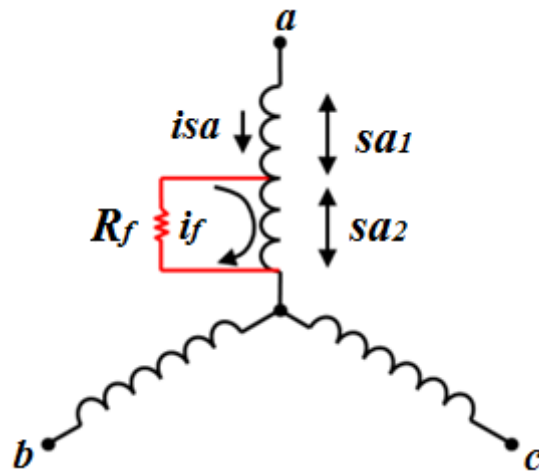


Figure (I.16) : Défauts de court-circuit entre spires

I.6.1.3. Un court-circuit entre phases

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système [16]

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs.

Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases

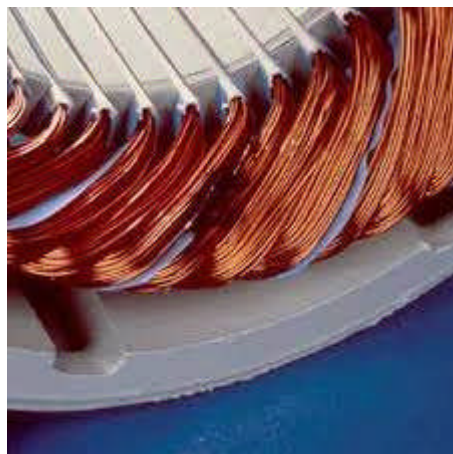


Figure (I-17) : Défaut d'un court-circuit entre phase

I.6.1.4. Défauts de circuit magnétique [8]

Ces défauts Figure (I.18) aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant, etc.

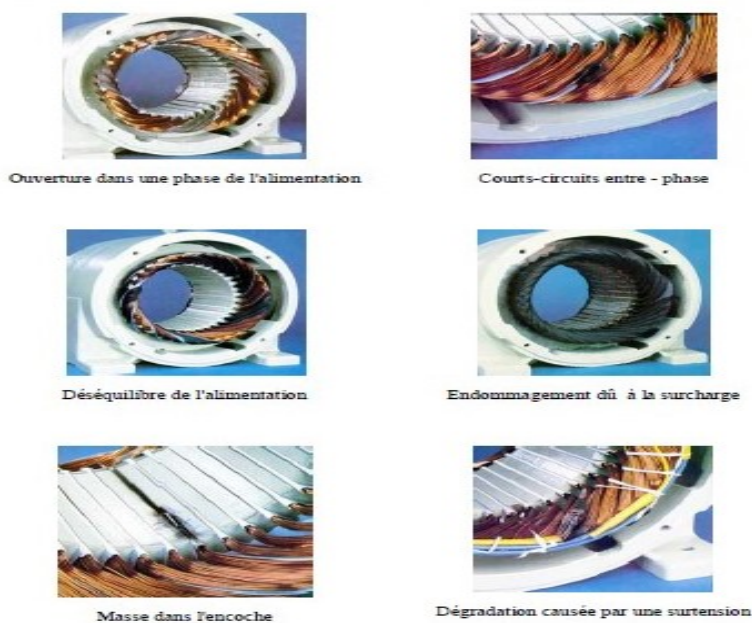


Figure (I-18) : Défauts statoriques de la machine asynchrone

I.6.2. Les défauts rotoriques :

Dans les machines asynchrones à cage, les défaillances qui peuvent atteindre le rotor sont considérées comme plus variées et plus complexes que celles affectant le stator. Ceci est particulièrement vérifié pour les machines de faibles et moyennes puissances. Plusieurs

facteurs manifestent l'apparition des défaillances au niveau du rotor de la machine asynchrone, parmi eux, on cite [10] :

- Thermique (surcharge, ...).
- Electromagnétique (force en $B^2(t)$...).
- Dynamique (arbre de transmission, ...).

Les défauts qui sont les plus répétitifs, localisés au niveau du rotor sont : l'excentricité statique et dynamique, la rupture de barres rotoriques et la rupture d'une portion d'anneau de court-circuit

I.6.2.1. L'excentricité

Les conséquences des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité. L'excentricité d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe de sa fabrication. Celle-ci passe en effet par différentes étapes d'usinage et de montage qui induisent un décentrement du rotor par rapport au stator. Lors du fonctionnement de la machine, deux causes principales aggraveront l'excentricité. La première est inhérente à la chaîne cinématique dans laquelle la machine intervient et qui peut imposer une force radiale sur l'arbre de cette machine, qui va engendrer une usure des roulements et une amplification du décentrement. Le deuxième phénomène risquant d'aggraver l'excentricité est quant à lui inhérent au fonctionnement de la machine ; en effet, le décentrement génère un déséquilibre dans la distribution des efforts radiaux entre le stator et le rotor. L'effort radial est maximal à l'endroit où se situe l'épaisseur minimale de l'entrefer et va tendre à diminuer encore plus la valeur de l'entrefer minimal et augmenter par conséquent encore plus le déséquilibre des efforts radiaux. Le point ultime de l'excentricité est le frottement du stator sur le rotor, qui est synonyme de destruction rapide de la machine. Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées.

- L'excentricité statique (Figure I-19(a)) – généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. La cause principale c'est un défaut de centrage des flasques.
- L'excentricité dynamique (Figure I-19 (b)) – correspond, elle à un centre de rotation du rotor différent du centre géométrique du stator, mais, de plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator. Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindrerotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes.
- L'excentricité mixte (Figure I-19(c)) – la somme des deux cas présentés ci-avant.

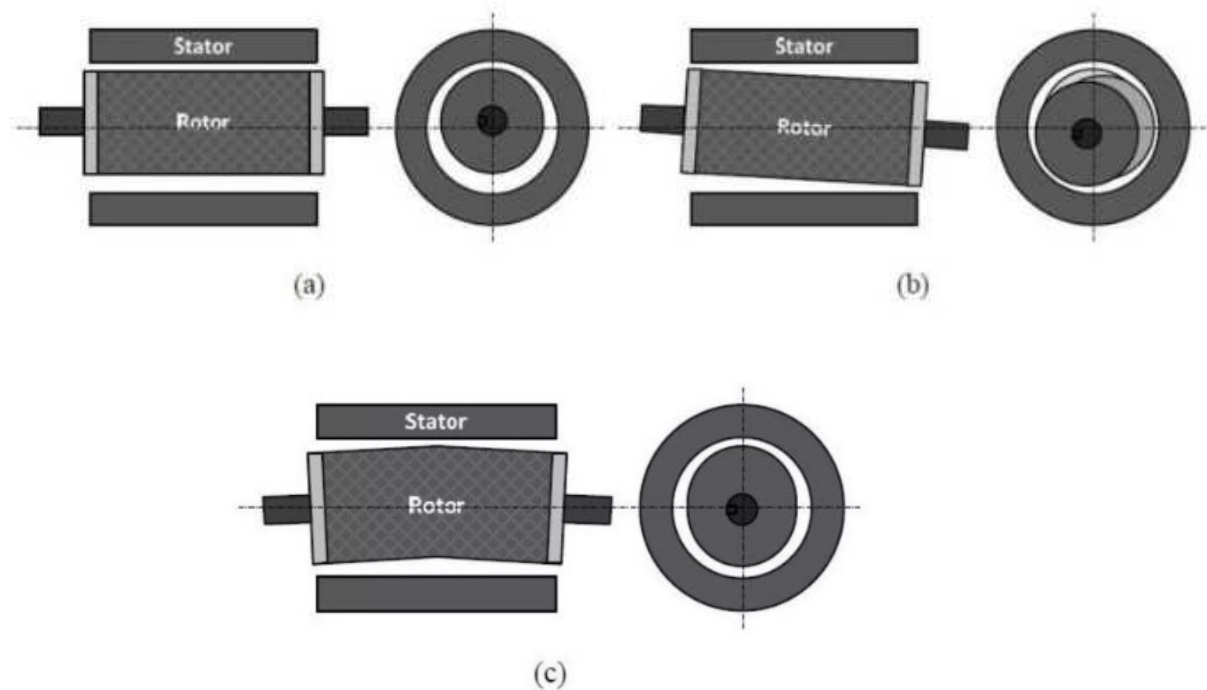


Figure (I-19) : Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte

I.6.2.2. Défauts de rupture de barres et d'anneau de court-circuit

Pour une machine asynchrone à cage d'écureuil, les défauts se résument à la rupture de barres ou à la rupture d'anneaux de court-circuit. La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau de court-circuit. Les ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, par exemple, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents, etc.), à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures). La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine. Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées [8], [5].

La cassure de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres dans une machine asynchrone à cage. Ces cassures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux, d'autant que les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des

barres rotoriques. Il convient de mentionner, qu'un mauvais dimensionnement des anneaux, conduit à une détérioration des conditions de fonctionnement ou une surcharge de couple et, donc, à des courants pouvant entraîner leur cassure.

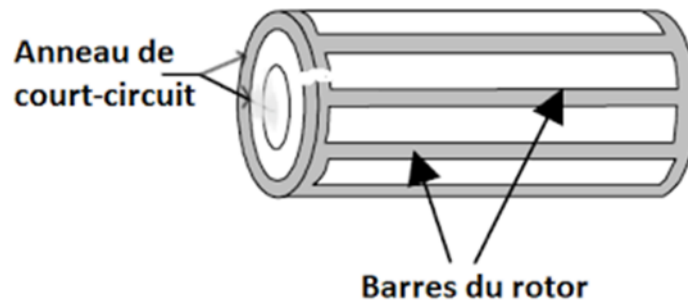


Figure (I-20) : Rupture d'anneau de court-circuit

I.6.2.3. Les défauts de roulement

La plupart des défauts observés sur le terrain sont liés à l'usure abrasive, à l'humidité, à la corrosion, au montage incorrect, à des ajustements incorrects des bagues sur l'arbre ou dans le palier, au glissement des éléments roulants, à une pollution imprévue ou à la défaillance de la cage, des joints ou de la lubrification, une charge excessive. Ils entraînent des effets mécaniques dans les machines tels que l'augmentation du niveau sonore et l'apparition de vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinal de la machine. Ces types de défaut induisent également des variations (oscillations) dans le couple de charge de la machine asynchrone. Le point ultime de roulements défectueux est le blocage du rotor. La Figure (I.21) présente une vue coupe d'un roulement à billes [9].

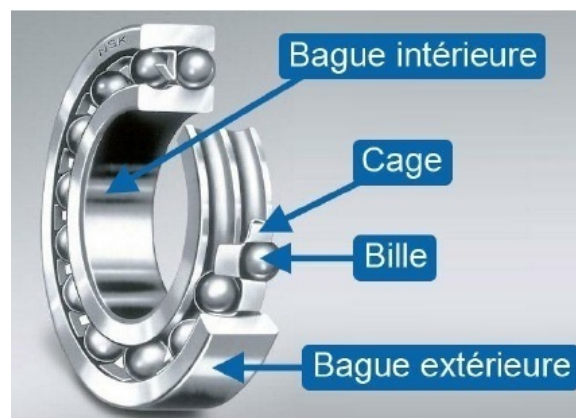


Figure (I-21) : Roulement à bille

I.7. Conclusion

En conclusion, les moteurs asynchrones à cage jouent un rôle crucial dans de nombreuses applications industrielles et commerciales en raison de leur fiabilité, de leur simplicité de conception et de leur coût relativement bas. Cependant, malgré leurs avantages indéniables, ces moteurs ne sont pas exempts de défauts. Ce chapitre a examiné en détail des généralités sur le fonctionnement des moteurs asynchrones à cage ainsi que les défauts les plus courants auxquels ils sont confrontés.

Nous avons exploré les diverses pertes électriques et mécaniques auxquelles ces moteurs sont sujets, ainsi que les défauts électriques tels que les courts-circuits et les déséquilibres de tension.

CHAPITRE II

**Mode de transfert de chaleur, Méthodes d'Etude
thermique et Moyens de Mesure de Température
dans une Machine électrique**

II.1 Introduction

La conversion de l'énergie électromagnétique dans les machines électriques s'accompagne de pertes (électromagnétiques et mécaniques) qui se transforment en énergie calorifique, entraînant une élévation de température à l'intérieur de la machine.

L'évacuation de cette chaleur s'effectue par trois modes de transfert :

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

Dans ce chapitre, nous commençons par donner une brève description des différentes modes de transmission de chaleur (conduction, convection et rayonnement) ainsi que les lois qui les régissent. Ensuite les différents moyens de mesure de la température. Et Enfin nous présenterons les méthodes d'étude thermique des machines électriques.

II.2. Modes de transfert de chaleur

II.2.1. Transfert de chaleur par conduction

La conduction est définie comme étant un processus d'échange d'énergie interne causé par une différence de température entre deux régions d'un milieu solide, liquide ou gazeux, sans déplacement de matière. Ce transfert est décrit dans un milieu homogène par la loi de Fourier, qui établit une relation entre la densité de flux de chaleur et le gradient de température [11]

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

Ou sous forme algébrique pour le flux de chaleur :

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

Avec

ϕ : Flux de chaleur transmis par conduction (W).

T : Température (°C).

λ : Conductivité thermique (W/m °C).

S : Air de la section traversée par le flux de chaleur (m^2)

Le signe (-) de la relation de Fourier traduit 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.

II.2.1.1. Conductivité thermique :

La conductivité thermique est une propriété physico-chimique de la matière que l'on appelle aussi le coefficient de conduction thermique [11].

Dans de nombreux cas pratiques, lorsque les écarts de température ne sont pas trop importants, on peut considérer la conductivité thermique comme une constante pour un milieu donné.

Alors on peut l'exprimer par trois composants pour saisir sa signification physique, de la relation de Fourier on peut écrire :

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

II.2.1.2. Conductivité thermique des solides hétérogènes :

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

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

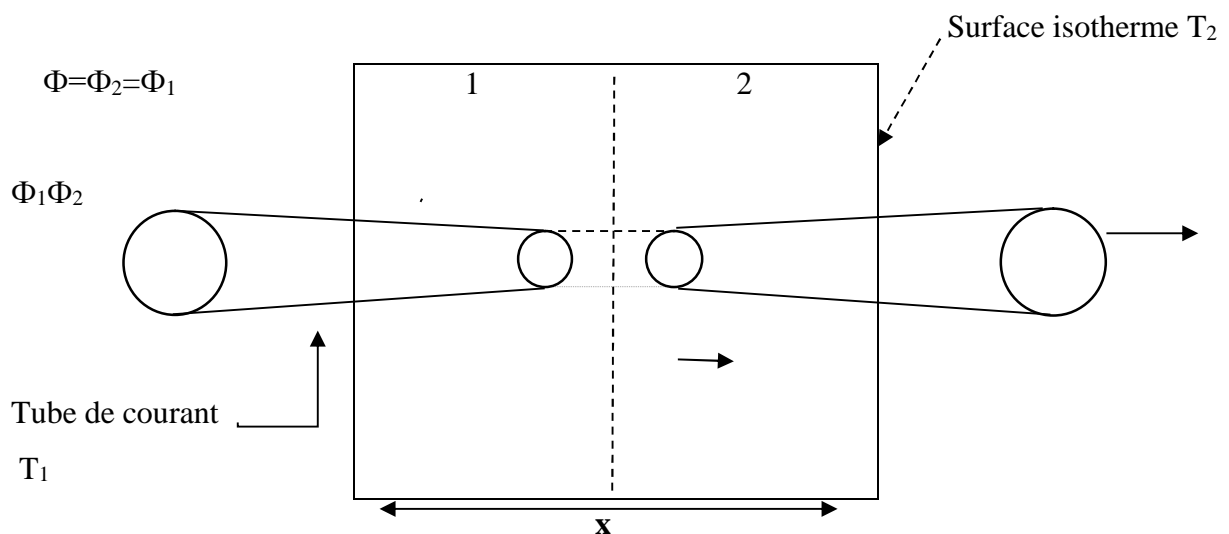


Figure (II-1) : Transmission de chaleur par conduction [11]

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

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

Avec :

Φ : Flux d'énergie transmise

S : surface à travers laquelle se propage le flux thermique (m^2)

e : distance entre deux surface dont la température est T_1 et T_2 (m)

λ : conductivité thermique ($W/m^\circ C$)

D'où :

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

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

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

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

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

➤ 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) internes et externe du cylindre

➤ **Cas d'une sphère :**

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

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

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

1 Association parallèle

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

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

S_{moy} : Dans le cas des géométries différentes est remplacé par S_i

$$\Phi_x = \sum \Phi_{xi} x_i$$

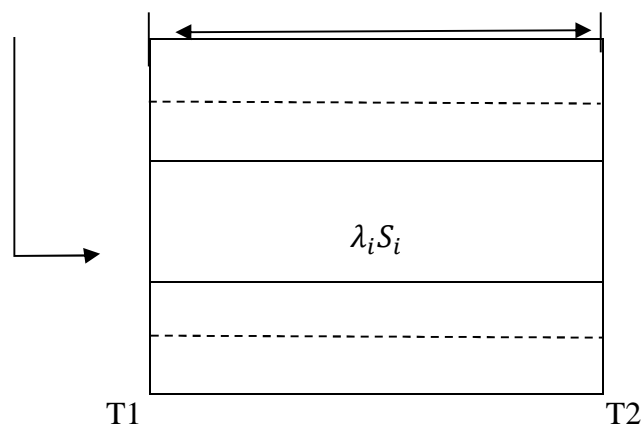


Figure (II-2) : Association parallèle [12]

2. Association série

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

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

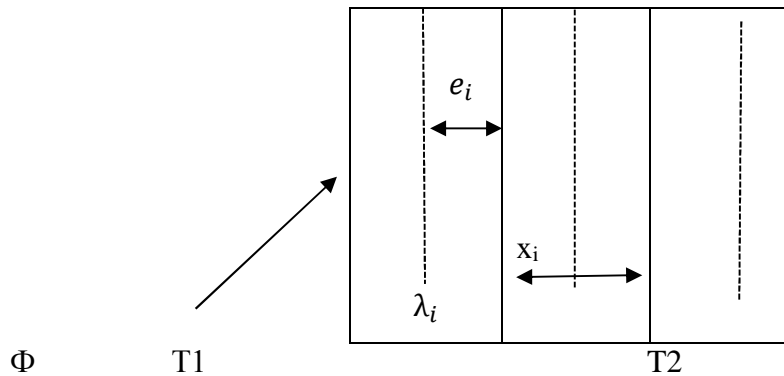


Figure (II-3) : Association série [12]

II.2.2. Transfert de chaleur par convection

La convection thermique est un mode de transfert de chaleur qui se produit le plus souvent entre un fluide en mouvement ou non et une paroi solide [10]

Ce mode de transfert de chaleur peut être modélisé par la loi de Newton qui relie la densité de flux et la variation de température entre deux milieux par la relation suivante :

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

Avec :

Φ : Flux de chaleur transmis par convection (W).

h ; coefficient de chaleur par convection ($W/m^2 \cdot ^\circ C$).

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

T_∞ : Température de fluide loin de la surface ($^\circ C$).

S : Aire de la surface du contact solide /fluide (m^2)

La convection peut se diviser en deux modes :

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

II.2.2.1. Convection naturelle :

La convection naturelle se produit lorsque le mouvement du fluide apparait naturellement en raison de la variation de la température à l'intérieur de fluide ou entre le fluide et la surface de contact.

Ce phénomène se produit généralement sur les culasses extérieures des machines.

II.2.2.2. Convection forcée :

Dans ce cas, le mouvement du fluide est provoqué par une force externe, telle qu'une pompe ou un ventilateur, indépendamment des variations de température.

Cette étude du transfert de chaleur par convection permet de déterminer l'échauffement de chaleur se produisant entre le fluide et une paroi [10]

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

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

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

II.2.3. Transfert de chaleur par rayonnement

Le rayonnement thermique consiste en des ondes électromagnétiques qui transportent l'énergie émise à partir de la surface d'une substance sans avoir besoin d'un support matériel.

Dans les problèmes de conduction on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant [13]

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

$$\varphi = \varepsilon_{12} \sigma S(T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{II.13})$$

φ : flux de chaleur transmis par rayonnement [W]

T1 : température du solide 1 [W]

T2 : température du solide 2 [W]

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

σ : est la constante de Stephan-Boltzmann.

II.3. Echange thermique dans une machine électrique :

Une machine électrique tournante présente une très forte hétérogénéité thermique, conséquence des propriétés des différents matériaux (divers isolants et conducteurs, présence de l'air, interstices, etc.) qui la constitue et l'écoulement s'en trouve compliqué.

La convection se rencontre surtout sur les bouts, dans l'entrefer et à l'extérieur du moteur ; sa prise en compte dépend aussi du modèle adopté (2D ou 3D), des hypothèses adoptées et des caractéristiques du moteur. Enfin le rayonnement se produit principalement dans l'entrefer entre le stator et le rotor. La conduction est un transfert de chaleur à travers une matière stationnaire par contact physique.

II.3.1. Méthodes d'études thermiques :

Le domaine d'étude thermique des actionneurs électromécaniques s'intéresse à deux axes principaux :

Le premier est basé sur la détermination expérimentale de températures.

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

- La méthode nodale ;
- Les méthodes numériques ;

II.3.1.1. Méthode expérimentale :

La méthode expérimentale est l'une des méthodes les plus anciennes et toujours d'actualité, est restée indispensable pour valider et garantir les résultats des méthodes théoriques. Elle permet d'utiliser divers appareils et capteurs de mesure en fonction des besoins et des conditions spécifiques d'expérimentation. Parmi ces méthodes on cite :

II.3.1.2. Méthode calorimétrique

Cette méthode permet de déterminer les pertes d'une machine électrique, nécessite une infrastructure lourde, avec l'installation de la machine dans une enceinte isolée pour mesurer l'énergie calorifique fournie par le système de refroidissement [11].

Le schéma d'une telle réalisation est présenté sur la (Figure II-4)

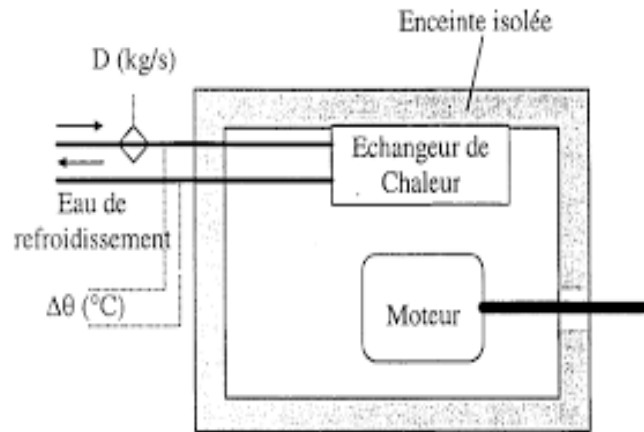


Figure (II-4) : Dispositif de mesure calorimétrique

Cette méthode est très lente et exige l'utilisation d'instruments de mesure très précis.

Les défis liés à l'utilisation de cette méthode calorimétrique sont de trois types :

- l'imprécision des appareils de mesure ;
- les pertes de chaleur aux parois de l'enceinte ;
- les fuites de chaleur au contact arbre-paroi (défaut d'isolement)

II.3.1.3. Mesure de la température par des capteurs :

La mesure de température par des capteurs est une méthode courante et essentielle dans de nombreux domaines, notamment l'industrie, la recherche scientifique.

Les capteurs les plus utilisés sont les thermocouples et les thermistances, qui convertissent les changements de température en signaux électriques mesurables.

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

II.3.1.4. Mesure de température par caméra infrarouge :

La caméra thermique est un outil essentiel à la thermographie infrarouge.

Celle-ci consiste à détecter les tendances thermiques ou les variations de température dans les objets sans contact. Cette méthode de mesure sans contact élimine l'influence du capteur, mais elle est généralement utilisée lorsque la surface de l'objet est accessible et visible par la caméra.

II.3.2. Méthode théorique :

Les méthodes théoriques sont utilisées pour développer les modèles thermiques. Une fois validés par des résultats expérimentaux. Ces modèles servent à la conception de nouvelles machines.

II.3.2.1. Méthode nodale :

La méthode nodale est une méthode très ancienne, son principe consiste à ramener l'étude du comportement thermique à un schéma équivalent en utilisant les notions de résistances et de capacités thermiques, ou les pertes constituent alors la source de chaleur et le potentiel aux différents nœuds donne la température.

Nous rappelons sur le tableau (II-1) l'analogie thermoélectrique. et sur le tableau (II-2) les expressions générales des résistances thermiques pour différents modes de transfert de chaleur.

Tableau II-1 : Analogie thermoélectrique

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

Tableau II.2 : Résistance thermiques pour différents modes de transfert de chaleur

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

L'utilisation de ces méthodes nécessite la définition d'un paramètre commun dans les zones solides et fluides.

Les principales étapes de la réalisation de cette modélisation sont les suivantes. La machine est divisée en éléments essentiels (bobinages statoriques, fer statorique et fer rotorique). La machine est divisée en cinq parties selon une autre approximation plus performante, comme illustré dans la figure (II-5). Chaque élément est identifié par un nœud dans le réseau thermique, avec sa capacité thermique et la source de chaleur.

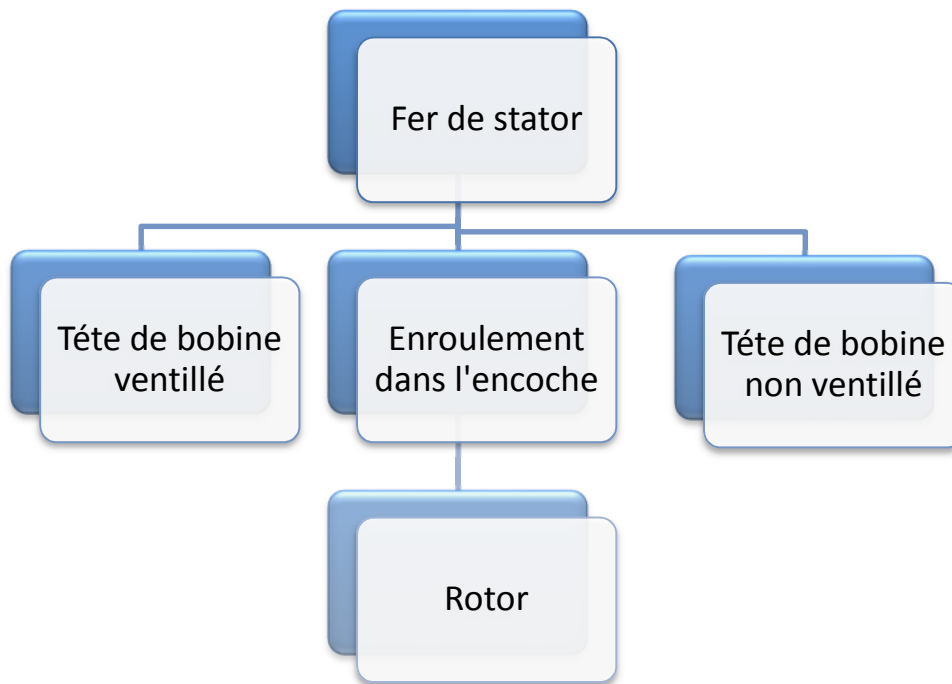


Figure (II-5) : Découpage du moteur en 5 parties

On peut déterminer la température aux nœuds au régime permanent avec la résolution du système suivant :

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

Où :

G : la matrice des conductances thermiques.

θ : Le vecteur de température inconnue.

P : Le vecteur des pertes.

II.3.3. Méthode numérique

Les méthodes de résolution numérique offrent des bénéfices plus importants au détriment d'une certaine complexité. Ces méthodes reposent sur une division plus ou moins fine du système modélisé, ce qui permet de prendre en compte divers paramètres (linéarité, géométrie, complexe...etc.) qui sont généralement négligés lors des méthodes analytiques.

Les méthodes numériques les plus couramment employées dans le secteur de la thermique sont les différences finis et les éléments finis.

II.3.3.1. Méthodes des différences finies

Cette méthode est basée sur le principe que chaque élément est associé au nœud connecté à ses voisins. La température de chaque nœud est déterminée en fonction de la température des nœuds adjacents, ce qui permet de résoudre l'équation de transfert de chaleur de manière efficace. Cela fait de cette méthode un outil utilisé depuis longtemps pour la modélisation et la simulation de phénomènes thermiques.

II.3.3.2. Méthodes des éléments finis

La méthode des éléments finis permet de résoudre des problèmes d'équation aux dérivées partielles. Cette méthode repose sur la transition du milieu continu vers sa représentation discrétisée.

C'est-à-dire que la représentation du domaine est divisée en plusieurs sous-domaines élémentaires, appelés éléments finis.

II.4. Moyens de mesure de la température dans une machine électrique.

II.4.1. Introduction :

La détermination de l'énergie thermique ne peut être réalisée directement ; on se sert plutôt de diverses propriétés physiques influencées par la chaleur pour mesurer la température, telles que la dilatation des métaux ou des liquides, la résistance électrique, la tension thermoélectrique, ou encore la fréquence des oscillations d'un quartz [14].

Lorsqu'il s'agit de surveiller la température dans une machine électrique en pleine activité, il est essentiel de considérer tous les points sources de chaleur. Pour ce faire, différentes méthodes de mesure de température sont employées, chacune avec ses propres capteurs et appareils sensibles. Trois approches principales émergent :

II.4.1.1. La méthode de mesure par contact direct : Elle implique l'utilisation de capteurs actifs en contact direct avec la source de chaleur. Parmi ceux-ci, on retrouve les thermocouples, les thermistances, et les sondes à résistance (couramment utilisées dans les systèmes de protection des machines électriques).

II.4.1.2. La méthode de mesure sans contact : Elle repose sur la corrélation entre la température d'un objet et le rayonnement optique qu'il émet.

II.4.1.3. La méthode de mesure mixte : Cette approche combine les deux méthodes précédentes et est souvent employée dans des travaux de recherche nécessitant une précision accrue.

II.4.2. Méthode de mesure par contact direct.

Cette approche est largement adoptée dans les composants stationnaires des machines électriques afin de surveiller leur température. Elle repose sur l'utilisation de capteurs qui établissent un contact direct avec la partie de la machine à mesurer, permettant ainsi la transmission des données thermiques. Les dispositifs les plus couramment employés à cette fin sont les thermocouples et les thermistances.

II.4.2.1. Les thermocouples

Le thermocouple est un capteur de mesure de température basé sur l'effet thermoélectrique [(effet Seebeck). (Physicien Allemand)], 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 à mesurer la jonction de mesure T_2 représenté sur la Figure(II-6) Les deux autres extrémités reliées à un appareil de mesure de température appelé la jonction de référence ($T_1=T_{ref}$). Lorsque les deux extrémités sont soumises à des températures différentes, une différence de potentiel apparaît entre les conducteurs. La température est donc mesurable connaissant la température de référence [14].

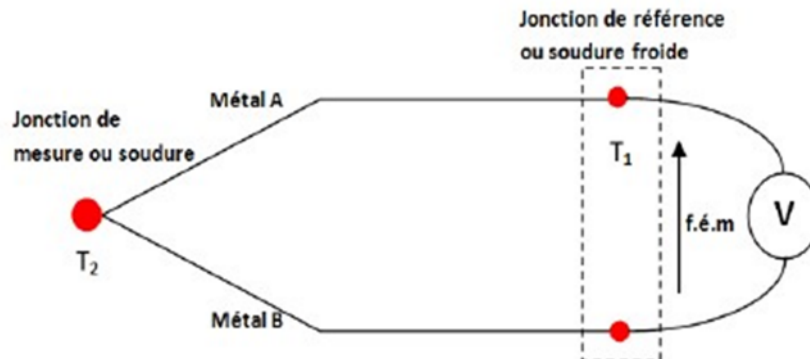


Figure (II-6) : Constitution d'un circuit thermocouple [14].

Définition de l'Effet Seebeck.

L'effet Seebeck décrit la force électromotrice (f.é.m.) ou la tension induite par le gradient de température le long du fil. La variation de la force électromotrice 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. Cependant, pour de petites variations de température sur la longueur d'un conducteur, la tension est peu près linéaire, ce qui peut être représenté par l'équation suivante où ΔV est la variation de tensions (le coefficient de Seebeck), et ΔT la variation de température :

$$S_{AB} = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (\text{II.15})$$

II.4.2.1.1. La température de référence d'un thermocouple :

La f.é.m d'un thermocouple dépend à la fois de la température T_c de la jonction placée au point de mesure et la température, $T_{\text{réf}}$, de ses jonctions avec le fil de liaison. Pour cette dernière, on peut distinguer trois cas :

$T_{\text{réf}} = 0^\circ\text{C}$

$T_{\text{réf}}$ est constante mais différente de 0°C

$T_{\text{réf}}$ est variable, généralement égale à la température ambiante.

a-Température de référence est de 0°C :

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

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

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

$$V_{A/B}^{T_c 0^\circ\text{C}} = V_{A/B}^{T_c T_{\text{réf}}} + V_{A/B}^{T_{\text{réf}} 0^\circ\text{C}} \quad (\text{II.16})$$

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

$$V_{A/B}^{T_c T_{\text{réf}}}$$

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

c- La température de référence est variable $T_{\text{réf}} = T_{\text{amb}}$

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

$$V_{A/B}^{T_c 0^\circ\text{C}} = V_{A/B}^{T_c T_a} + V_{A/B}^{T_{\text{réf}} 0^\circ\text{C}} \quad (\text{II.17})$$

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

II.4.2.1.2. Différents types de thermocouple

Un thermocouple est formé par le contact entre deux métaux de natures différentes à l'une de leurs extrémités et la mesure à l'autre extrémité, ce qui entraîne une faible tension en circuit ouvert correspondant à une différence de température entre le point de contact et le point de mesure. La mesure de la tension à partir du thermocouple correspond à la différence entre la tension de Seebeck aux bornes de chaque conducteur.

Différents types de thermocouples peuvent être identifiés par des lettres capitales exprimant leur composition selon les normes ANSI (American National Standards Institute).

Par exemple, un thermocouple de type J est composé d'un conducteur en fer et d'un autre en constantan (alliage de cuivre et de nickel).

Tableau II.3 : Les différents types de thermocouples

Type de thermocouple	Conducteur-positif	Conducteur-négatif
B	Platine rhodié à 30%	Platine rhodié à 6%
E	Alliage nickel/chrome 1	Alliage cuivre/nickel
J	Fer Alliage	Cuivre/nickel
K	Alliage nickel/chrome	Alliage nickel/aluminium
N	Alliagenickel/chrome/silicone	Alliagenickel/silicone/magnésium
R	Platine rhodié à 13%	Platine
S	Platine rhodié à 10%	Platine
T	Cuivre	Alliage cuivre/nickel

II.4.2.1.3. Avantages et inconvénients des thermocouples:

1- Avantage :

- Faible coût d'achat.
- Robustesse.
- Une vitesse de réponse élevée.
- Pas d'alimentation.
- Gamme de température très large.
- Une grande souplesse d'utilisation.
- Pas d'encombrement.

2- Inconvénients :

- Non-linéarité
- Pas d'amplitude de signal.
- Correction indispensable pour la soudure froide.
- Nécessité de connaître la température de référence.

II.4.2.2. Les thermistances

II.4.2.2.1. Constitution et principe

La thermistance est un élément semi-conducteur thermosensible dont la résistance électrique varie considérablement quand la température varie. La plupart des thermistances utilisées sont des céramiques, et on peut les classer suivant leur caractéristique de base. En fonction de la valeur du coefficient de température des thermistances, selon que la courbe de résistance en fonction de la température est ascendante ou descendante, on parle de thermistance CTP (coefficient de température positif) ou CTN (coefficient de température négatif). La thermistance RTC (résistance à température critique) est une troisième sorte qui présente la même caractéristique que la thermistance CTN, mais sa résistance électrique diminue brusquement à partir d'une température spécifique.

La linéarité des thermistances est loin d'être réalisée, ce type de composante est souvent utilisé dans des appareillages de contrôle ou de commande, dans lesquels on détecte un seuil. En associant plusieurs thermistances et résistance dans un même boîtier, on parvient néanmoins à réaliser des composants linéaires sur une plage relativement étroite de température.

a-Thermistance CTN :

Les thermistances CTN comprennent principalement du NiO, du MnO et du Fe_{2O_3} , et ont une structure cristalline similaire à celle du spine. En général, les valeurs de résistance sont peu influencées par l'oxygène et sont donc stables à l'air libre. De plus, elles sont peu perturbées par des impuretés. La résistance d'une thermistance peut être exprimée de la manière suivante :

$$R(T) = R_0 (T_0) \exp B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (\text{II.18})$$

La résistance à la température absolue T_0 est représentée par R_0 , tandis que B est une constante caractéristique de la thermistance en question. Actuellement, la température de thermistance varie de 2000 à 5000 K et le domaine de mesure des températures peut atteindre 300°C. Les composants des thermistances à haute température sont ZrO_2 et Y_{2O_3} . Elles offrent la capacité de détecter des températures jusqu'à 1000°C.

b-Thermistances CTP

Les thermistances CTP reposent sur le groupe cristallin $BaTiO_3$, dont la valeur atomique est régulée en ajoutant des éléments de terres rares tels que Y_{2O_3} , donnant ainsi naissance à un semi-conducteur. La résistance augmente soudainement lorsque la température augmente. Les valeurs de résistance varient brusquement à une température proche du point de Curie du cristal $BaTiO_3$. Les thermistances CTP, étant les seules à avoir une telle caractéristique.

II.4.2.2.2. Les avantages et inconvénient des thermistances

1 Avantages

- la précision : elle peut atteindre $\pm 0,1^\circ\text{C}$.
- stabilité : elles ne sont pas sérieusement impactées par le processus de vieillissement.
- Sa petite taille permet de mesurer de manière ponctuelle la température.

2-inconvénient

- une gamme de température limitée de -80°C à $+120^\circ\text{C}$.
- absence de linéarité.
- alimentation essentielle -échauffement du capteur en raison de la tension



Figure (II-7) : Photos des deux types de thermistance CTN et CTP

II.4.2.3. Comparaison entres les thermocouples et les thermistances.

Des études comparant les avantages et les inconvénients des thermocouples et les thermistances, guident le choix de l'utilisation de ces capteurs.

On donne sur le Tableau II.4, une comparaison des principales caractéristiques de ces capteurs :

Tableau II.4 : Comparaison entre les thermistances et thermocouples

Caractéristiques	Thermistances	Thermocouples
Précision	Plus précis	Moins précis
Encombrement	Important	Réduit
Cout	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

II.4.3. Méthode de mesure de température sans contact :

Les méthodes de mesure sans contact consistent à transmettre l'information de la température et de ses variations sans aucun contact matériel entre l'élément sensible et le capteur. Les capteurs de température qui mettent en œuvre ces méthodes de mesure sont couramment appelés capteurs de température sans contact [10].

II.4.3.1. Bilan des avantages et des inconvénients :

Faire une mesure sans contact, c'est sans doute un avantage incontournable ouvrant les portes à une multitude de nouvelles applications. Cependant, les divers capteurs de température sans contact peuvent être plus ou moins adaptés et pratiques d'utilisation au regard de leur fonctionnement, surtout au regard de l'application envisagée. Ils présentent donc des avantages et des inconvénients divers qui doivent être étudiés pour chaque application donnée. Il n'est pas vraiment possible de désigner un capteur comme bon ou mauvais car les capteurs qui sont parfaitement adaptés pour certaines applications ne le sont peut-être pas pour d'autres. Le choix doit donc être fait en fonction des besoins de l'application donnée. L'objectivité de ce dernier exige des connaissances complexes sur toutes les méthodes de mesure utilisées, sur leurs avantages et limitations, ainsi que sur leurs coûts. La maîtrise de tous ces facteurs permet de trouver le compromis idéal pour une application donnée.

II.4.3.2. Classification des méthodes de mesure de la température sans contact :

Dans ce paragraphe nous distinguons deux grandes sous catégories pour la mesure de température sans contact Figure (II-8)

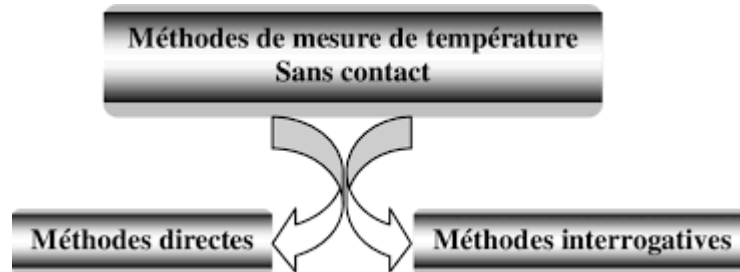


Figure (II-8) : Principales méthodes de mesure de température sans contact

1. Méthodes directe

Les méthodes directes de mesure de température sans contact consistent à analyser le rayonnement d'un corps, objet de la mesure, en fonction de la température. Ce sont des méthodes dites passives car aucun signal d'interrogation n'est fourni pour obtenir une réponse.

a-Principe de fonctionnement

Tout corps émet un rayonnement électromagnétique (de la lumière) dû à sa température. Les méthodes directes sont basées sur l'analyse du rayonnement émis par un corps pour déterminer sa température. La longueur d'onde (ou couleur) du rayonnement émis par le corps est directement liée à sa température. C'est donc le corps lui-même qui joue le rôle d'élément sensible et ce sont les variations de son rayonnement qui traduisent les variations de la température. La longueur d'ondes de l'ordre de plusieurs micromètres pour les températures autour de 20-30°C, et de l'ordre de centaines de nanomètres pour les températures élevées (par exemple le soleil). Ainsi, en analysant la lumière émise par un objet il est possible de déterminer sa température [16].

b. Pyromètres

Les capteurs de température mettant en œuvre les méthodes directes sont couramment appelés pyromètres ou encore pyromètres optiques. On distingue :

- Les pyromètres à radiation totale (radiation),
- Les pyromètres à récepteur sélectif,
- Les pyromètres à disparition de filament,
- Les pyromètres dichromatiques, ...

Grâce aux recherches très poussées et à l'évolution des technologies de fabrication, le domaine de la pyrométrie évolue à grands pas et des modèles de plus en plus sophistiqués sont désormais proposés sur le marché. Ils présentent certes de nombreux avantages mais également quelques inconvénients.

Avant tout, les pyromètres optiques offrent l'avantage incontournable d'effectuer des mesures de température sans contact.

- Très large étendue de mesure en température. La figure II.9 présente un nouveau modèle développé par la société Espi-Heitronics permettant des mesures de -50°C à 3000°C .



Figure (II.9) : Pyromètre infrarouge (plage de mesure- -50°C à 3000°C)

Possibilités d'effectuer des mesures de pièces sous tension (composants électriques/électroniques) ou ne pouvant pas être touchées (pièces stériles ou fraîchement peintes, etc.). Les mesures des pièces en mouvement ou la surveillance de processus industriels sont également possibles. Plusieurs fabricants proposent des modèles portables idéalement adaptés pour ces types de mesure. La figure II-10 présente un exemple de pyromètre portable pour des verres.



Figure (II.10) : Pyromètre portable

- Temps de réponse pouvant être très faible, de l'ordre de quelques ms, contrairement aux thermocouples qui affichent, au mieux, des temps de réponse de 0.05 secondes, ce qui est néanmoins très suffisant pour notre application.
- Distance de mesure importante.
- Durée de vie importante.
- Grande souplesse d'utilisation, etc.
- Les capteurs modernes offrent, désormais, des possibilités de communication Informatique avec l'intégration des normes usuelles des réseaux informatiques.

Les pyromètres optiques présentent également quelques inconvénients Les pyromètres optiques ne fournissent qu'une mesure surfacique de la température.

Les pyromètres optiques ne fournissent généralement pas la température thermodynamique exacte du milieu, sauf si des corrections d'émissivité et d'absorption sont appliquées. Ces corrections sont essentielles pour obtenir des mesures précises. Les pyromètres sont généralement étalonnés par le fabricant, mais ils ne fournissent qu'une mesure surfacique de la température, ce qui les rend moins adaptés pour mesurer la température à l'intérieur d'une enceinte hermétique, par exemple.

La détection d'un dépassement de seuil critique de température est possible avec les pyromètres, mais cela nécessite des mesures en temps réel, ce qui peut être coûteux et peu pratique, notamment pour des applications telles que le transport d'aliments ou de médicaments. Un dispositif capable de mémoriser le dépassement d'une température critique sans effectuer de mesures continues pourrait être plus approprié pour de telles applications.

La mise en œuvre des mesures pyrométriques peut être complexe et exigeante en termes d'instrumentation. De plus, la méthode est relativement coûteuse, ce qui peut limiter son utilisation dans certains cas. Bien que les pyromètres soient très précis, leur coût élevé les limite à des applications où ils sont absolument nécessaires.

2. Les méthodes interrogatives :

Les méthodes interrogatives permettent de mesurer la température sans contact en soumettant un élément sensible à un signal d'interrogation pour obtenir une réponse. Cette approche implique deux parties distinctes : l'élément sensible, qui réagit aux variations de température en modifiant une propriété spécifique, et le capteur équipé de l'instrumentation nécessaire pour interroger l'élément sensible et détecter sa réponse. Dans cette configuration, les deux parties sont totalement indépendantes et séparées. La figure (II.11) illustre schématiquement ce processus, où l'élément sensible et le capteur sont représentés respectivement par une bobine d'interrogation et une bobine de détection.

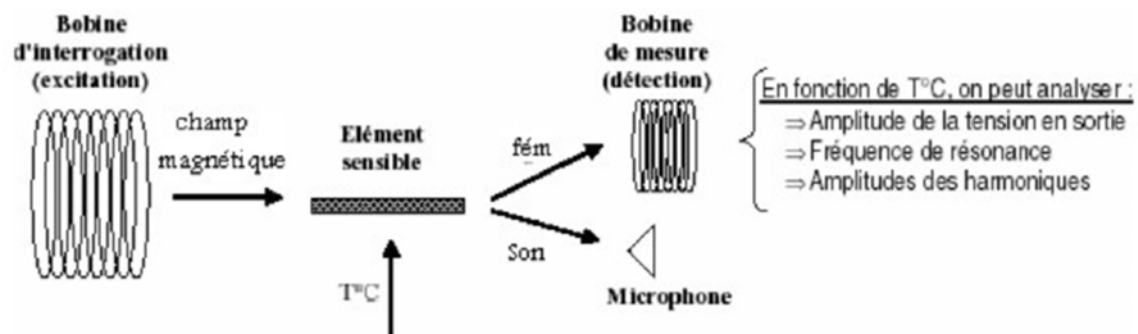


Figure (II.11) : Mise en scène des mesures de température sans contact par des méthodes interrogatives.

3- Caméra thermique

Une caméra thermique figure (II.12) capte le rayonnement infrarouge, émis par les corps et qui varie en fonction de leur température. Une caméra thermique produit donc des images représentatives de la température des objets filmés.



Figure(II.12) : Photo d'une caméra thermique

Bien que la longueur d'onde du rayonnement infrarouge dépende de la température, les caméras thermiques ont en général un seul canal (comme une caméra monochrome) et 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.

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les méthodes d'étude thermique d'une machine asynchrone, en détaillant les différents modes de transfert de chaleur associés à chaque partie de la machine et en exposant les lois générales qui régissent chacun de ces modes. Nous avons également discuté des moyens de mesure de température avec contact et sans contact.

CHAPITRE III

Modélisation thermique par éléments finis d'une machine asynchrone en présence d'un défaut de coupure d'une phase

III.1. Introduction

Pour concevoir des modèles préalables des machines électriques et prévoir leur comportement avant de les réaliser, plusieurs outils logiciels sont utilisés.

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

Dans ce chapitre, nous allons présenter la méthode des éléments finis et son application à la modélisation d'un moteur asynchrone à cage en utilisant le logiciel FEMM. On traite le cas sain et le cas d'un défaut de coupure d'une phase d'alimentation. Cela, pour diverses charges du moteur asynchrone avec un enroulement statorique à une couche ou deux couches.

III.2. Présentation du logiciel FEMM (Finit elementsMethodMagnetics)

Le logiciel FEMM est un logiciel simple, gratuit permettant de résoudre des problèmes d'électromagnétisme en basse fréquence 2D plans, y compris Electrostatiques et Magnétique. Le programme aborde les problèmes magnétiques et magnétostatiques harmoniques linéaires et non linéaires ainsi que les problèmes d'électrostatique linéaire et les problèmes de flux de chaleur [18].

Ce logiciel comporte trois (3) programmes essentiels qui sont :

1. **Femm.exe** : Est un 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, de 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 de champ magnétique dans le domaine étudié.

La méthode des éléments finis peut être programmée en utilisant les 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.

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

III.3. Utilisation du logiciel FEMM

Pour un bon usage du logiciel FEMM dans l'analyse des machines électriques, voici les étapes à suivre [19] :

1. Définir le problème

La première étape est la définition du problème qui comprend les quatre (4) éléments importants suivants :

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

2. Dessiner la structure géométrique

La prochaine étape est de dessiner la structure géométrique en utilisant les outils de dessin dans la barre d'outils pour créer la géométrie (points, lignes, arcs, segments...etc.).

3. Définir les propriétés des matériaux

- Ajouter les matériaux nécessaires en spécifiant leurs propriétés (conductivité électrique, perméabilité magnétique...etc.)
- Assigner les matériaux à différentes régions de la géométrie étudiée.
- Ajouter les densités de pertes à injecter.

4. Imposer les conditions aux limites

Utiliser l'outil **Boundary** pour définir les conditions aux limites sur les contours de la géométrie, et puis les affecter.

5. Créer le Maillage

Cliquer sur **Mesh** dans la barre d'outils pour générer le maillage de la géométrie après l'avoir enregistré, et utiliser l'outil **Zoom** et **pan** pour vérifier la géométrie en détail.

6. Résolution du système

La dernière étape est la résolution du système.

Voici la **figure III.1** qui représente la fenêtre du modèle étudié :

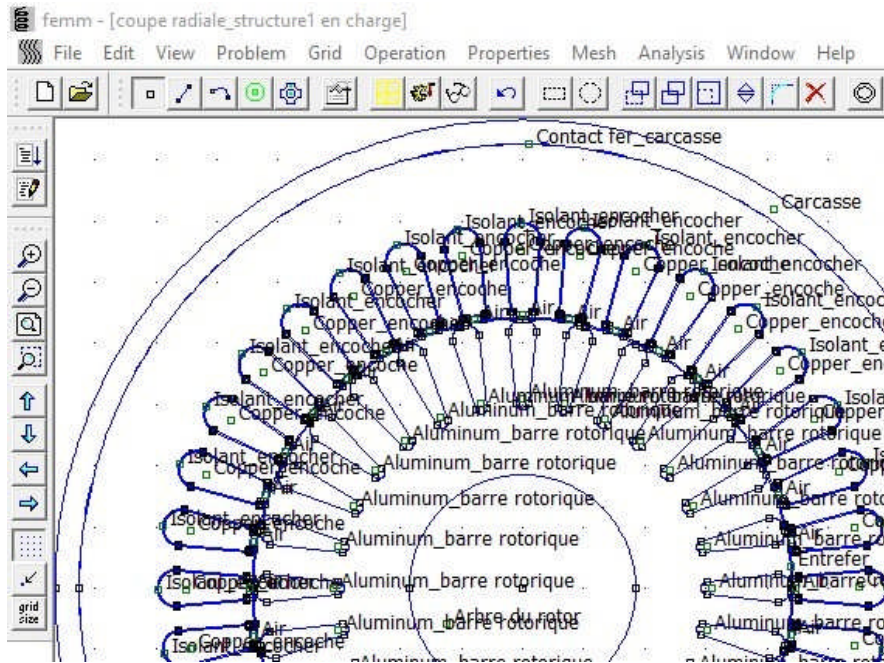


Figure III.1. Fenêtre du modèle étudié

III.4. La structure du modèle étudié

La machine utilisée pour nos simulations est un moteur asynchrone à cage,

Etant donné que FEMM est un logiciel spécialisé dans la résolution de problèmes en 2D, nous étudierons le moteur sous la forme d'une coupe radiale en 2D [20].

La structure de cette coupe radiale est représentée sur la Figure III.2

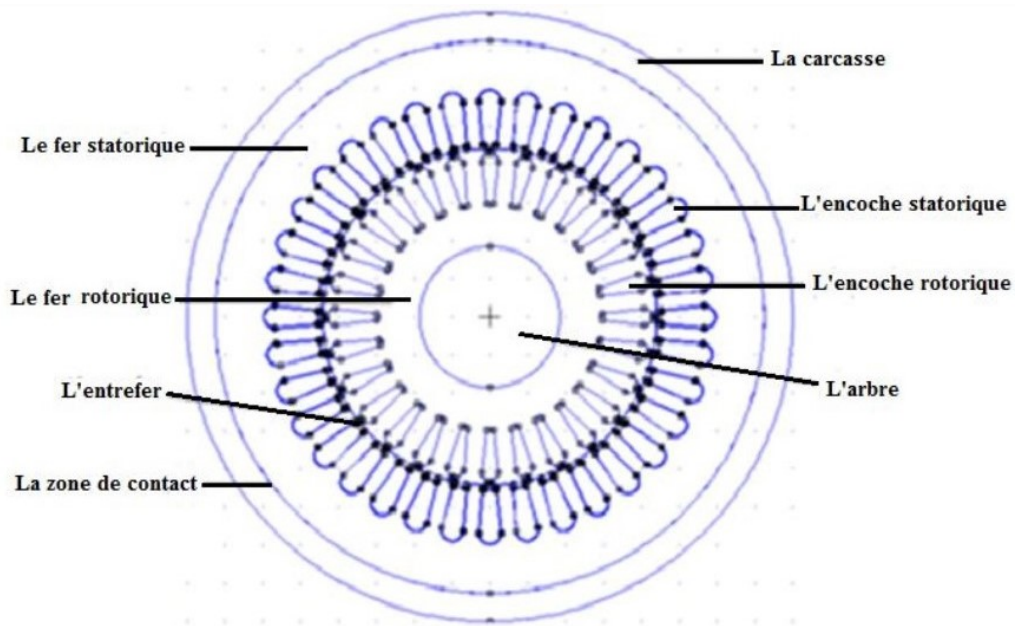


Figure III.2. Structure du modèle réalisé de la machine étudiée sur FEMM.

III.5. Evaluation des paramètres thermo-physiques

Pour effectuer le calcul de la température d'une structure, il est en effet nécessaire de connaître certains paramètres thermo-physiques des matériaux utilisés, la conductivité thermique qui est une propriété fondamentale des matériaux représenté dans le tableau III.1 et la densité de pertes (voir Annexe B)

Les pertes se localisent dans plusieurs éléments du moteur notamment les encoches, le fer statorique et rotorique, les têtes de bobines, la cage d'aluminium et les roulements.

Pour déterminer la densité des pertes au régime sain, comme indiqué dans le tableau III.2, nous avons d'abord calculé les pertes Joule dans les encoches, les têtes de bobines, et le rotor, ainsi que les pertes constantes (voir Annexe B, page B-1, B-2, B-3).

Ensuite, nous avons déterminé les volumes du matériau correspondants à chaque type de perte et calculé le rapport entre les pertes et le volume pour chaque composant du moteur (Annexe B, la page B-3et B-4).

Pour déterminer la densité des pertes au régime de défaut de coupure d'une phase d'alimentation, comme indiqué dans le tableau III.3, nous avons d'abord observé que, lors de l'échec d'une phase, le courant dans la première phase augmente d'environ 47.98%, tandis que le courant dans les deux phases restantes, désormais connectées en série, diminue de 14.87%. (Ces pourcentages sont déduits d'un essai à vide en couplage triangle. (Voire la plaque signalétique en annexe A).

Donc pour calculer les pertes joule dans les encoches au régime déséquilibré, nous prenons en compte les variations du courant et la résistance R_s .

Ensuite, nous déterminons les volumes correspondants par phase, et enfin nous calculons le rapport entre les pertes dans les encoches et le volume par phase.

Les densités de pertes pour les autres blocs du moteur sont considérées comme constantes (Voire l'Annexe B)

Pour la densité de pertes à l'essai de surcharge de 10% du courant nominal est représentée dans le tableau (III.4) , premièrement on extrapole l'essai en charge nominale jusqu'au glissement de 5% qui correspond au courant de 3.48A(10% de surcharge) et on calcule les pertes Joule statoriques, les pertes Joule rotoriques en régime sain en tenant compte de la résistance $R_S=10.8$ ohm et les densités de pertes des autres blocs restent constantes (pertes fer et mécanique), et au régime de défaut on applique les pourcentages des courants pour les pertes Joule statorique (voir l'annexe B).

III.5.1. La conductivité thermique

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

Tableau III.1. Conductivité thermique des différentes zones du modèle étudié [21].

Région	Conductivité thermique [W/m°C]
Arbre (Acier)	50
Fer statorique et rotorique	55
Encoche rotorique et carcasse (Aluminium)	204
Enroulements dans les encoches statorique	0.8
Entrefer	0.03
Contact fer-carcasse	0.05
Air	0.02

III.5.2. Les densités de pertes

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

Tableau III.2.Densités de pertes des différents blocs du moteur en régime sain.

Densité de pertes W/m^3 Essai	Encoches	Fer statorique	Fer rotorique	Aluminium
A vide	446084.1	137231.5	0	0
En Charge nominale	1473362.8	137231.5	0	486518.2

Tableau III.3. Représente les densités de pertes des différents blocs du moteur en régime de défaut de coupure d'une phase à vide et en charge.

Densité de pertes W/m^3 Essai	Encoches de la 1ère phase	Encoches des deux autres phases en série	Fer statorique	Fer rotorique	Aluminium
A vide	1430621.1	474083.8	137231.5	0	0
Encharge nominale	3514975.7	1159801.5	137231.5	0	486518.2

Tableau III.4. Représente les densités de pertes des différentes parties du moteur en régime de surcharge.

Densité de pertes W/m^3	Encoches de la 1ère phase	Encoches des deux autres phases en série	Fer statorique	Fer rotorique	Aluminium
Régime sain	1982423.6	1982423.6	1137321.5	0	538461.5
En présence du défaut	4324146.5	1443474.6	137321.5	0	538461.5

III.5.3. Le maillage de la structure en une seule couche

Le maillage s'effectue automatiquement sur le logiciel FEMM, il consiste à subdiviser la structure en des petits triangles, la structure maillée est représentée dans Figure III.3. Le maillage est plus fin dans l'entrefer et interface où les paramètres thermiques sont difficiles à identifier. Les conditions aux limites sont de type Dirichlet sur la surface extérieure de la carcasse.

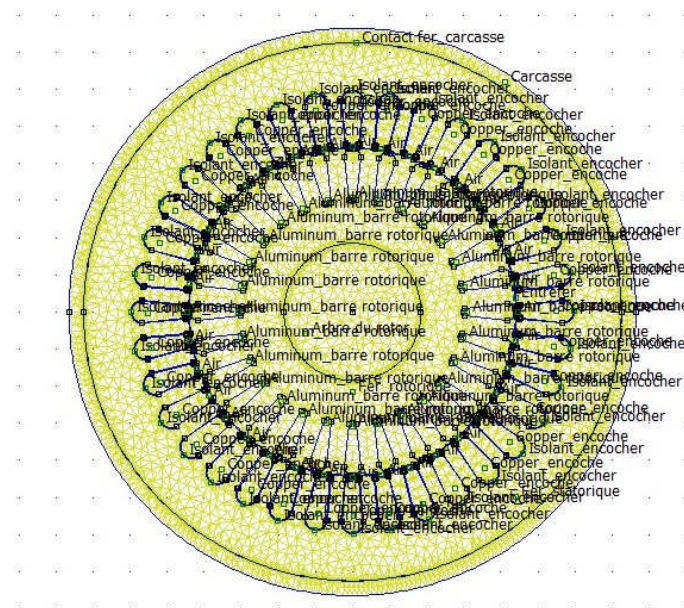


Figure III.3. Structure en une seule couche maillée d'une coupe radiale

III.6. Résultats de la simulation

III.6.1. Régime sain

III.6.1.1. Essai à vide

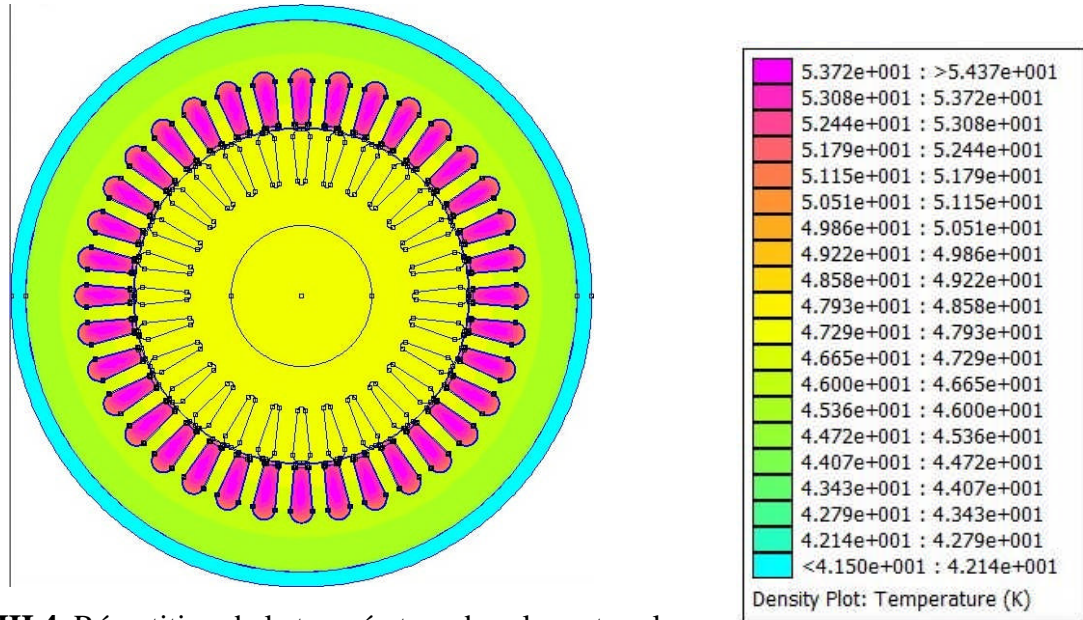


Figure III.4. Répartition de la température dans le moteur lors de l'essai à vide sur une coupe radiale.

III.6.1.2. Essai en charge nominale

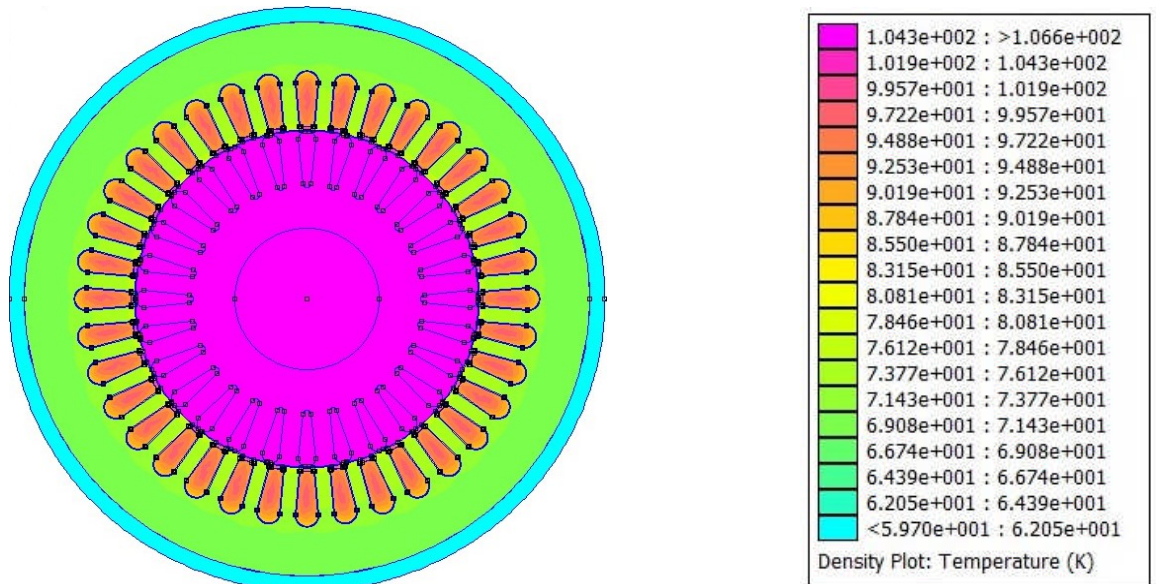


Figure III.5. Répartition de la température dans le moteur lors de l'essai en charge sur une coupe radiale.

III.6.2. Régime de défaut

Pour le régime du défaut les encoches statorique doivent être différentes figure.III.6

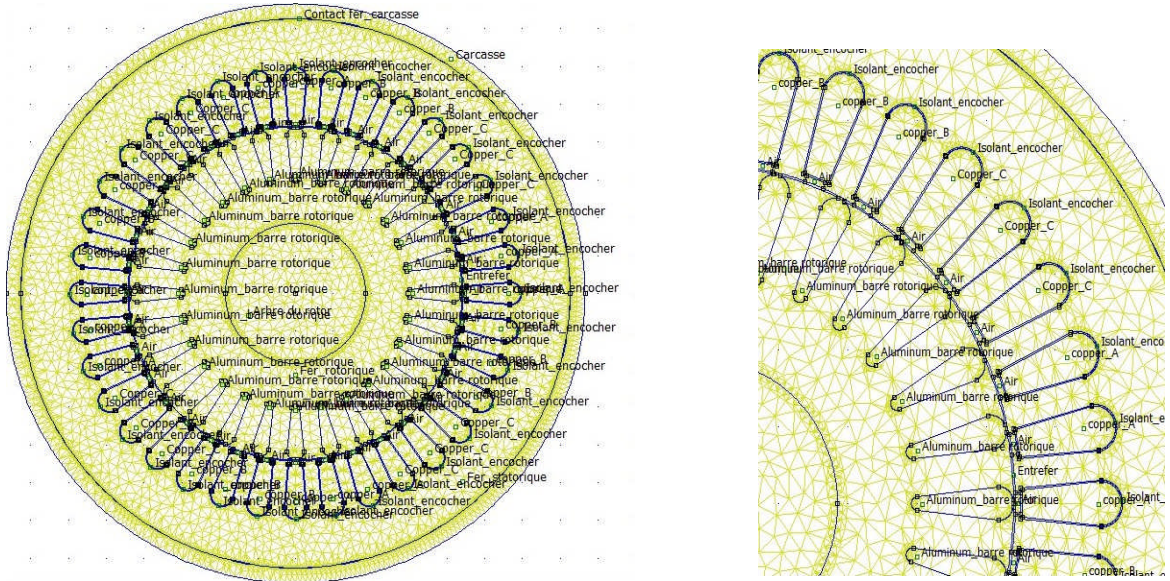


Figure III.6. Structure maillée d'une coupe radiale avec défaut.

III.6.2.1. Essai à vide

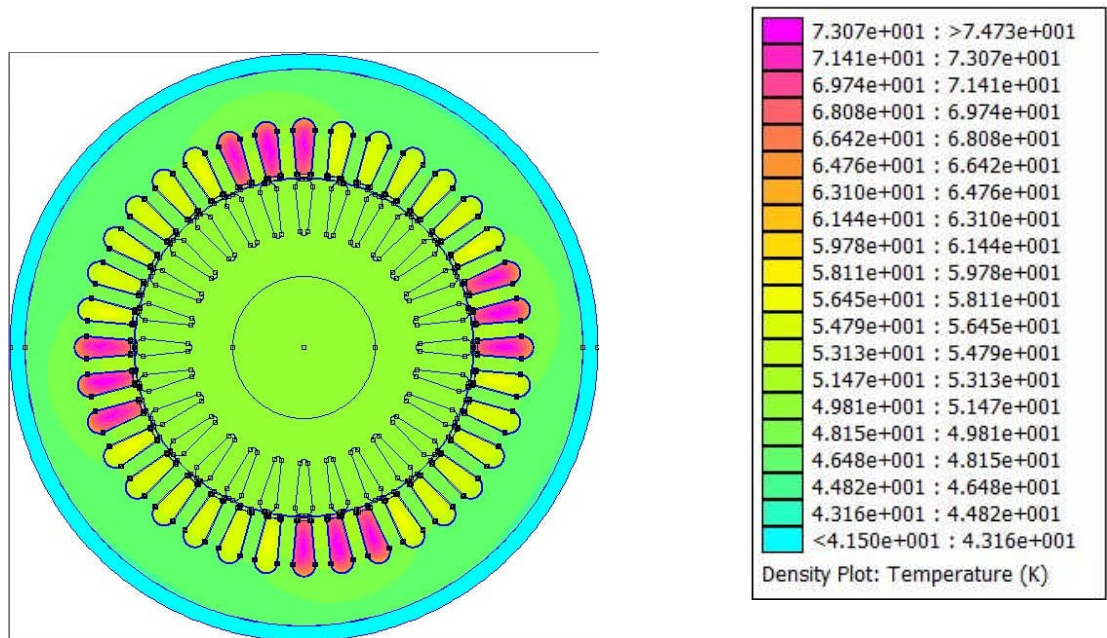


Figure III.7. Répartition de la température à l'essai à vide en présence de défaut de coupure d'une phase sur une coupe radiale.

III.6.2.2. Essai en charge nominale

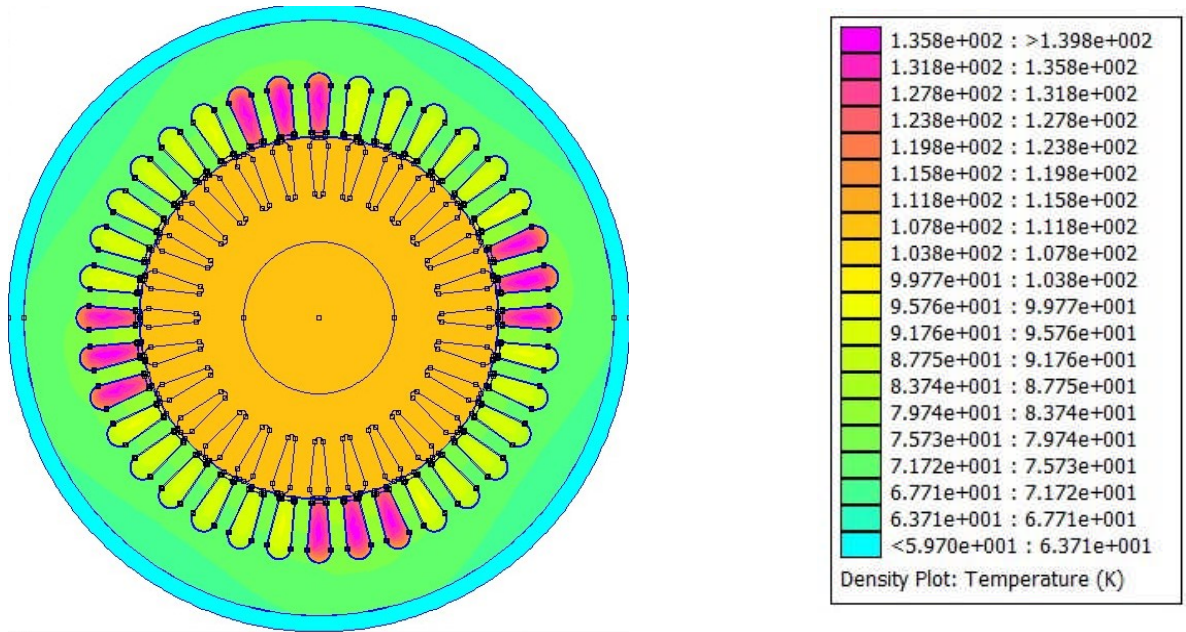


Figure III.8. Répartition de la température dans l'essai en charge en présence de défaut de coupure d'une phase sur une coupe radiale.

III.6.3. Interprétation des résultats

Dans les **Figures (III.4, III.5, III.7, III.8)** on peut observer la distribution de la température dans la machine étudiée. Les températures varient d'une région à l'autre et dépendent de la densité de pertes et de la conductivité thermique des matériaux.

Le tableau suivant Tableau III.5, montre les différentes valeurs de la température pour le cas de fonctionnement sélectionnés de la machine à une couche.

Tableau III.5 : Les différentes valeurs de la température pour le cas de fonctionnement sélectionnés de la machine asynchrone.

Type d'essai Zones	À vide en régime sain	À vide en régime de défaut	En charge en régime sain	En charge en régime de défaut
Rotor	47.7°C	50.6°C	106.5°C	110.4°C
Culasse statorique	46.11°C	48.08°C	71.5°C	74.1°C
Dent statorique	47.4°C	52.3°C entre les phases de défaut 48.7°C entre les deux autres phases	76.1°C	85.1°C entre phase de défaut 77.5°C entre les deux autres phases
Interface	43.4°C	44.2°C	64.4°C	65.5°C
Carcasse	41.50°C	41.5°C	59.7°C	59.7°C
Entrefer	47.7°C	50.6°C	92.2°C	93.3°C
Encoche statorique	54.3°C	74.4°C phases de défaut 55.8°C les deux autres phases en série	97.6°C	138.9°Phases de défaut 93.6°C les deux autres phases en série

Les Figures III.9, III.10, III.11, III.12, III.13 et III.14, montrent les résultats de la température de la machine, pour différentes charges en mode sain et en mode de défaut, en fonction de la distance du centre de la machine vers la carcasse.

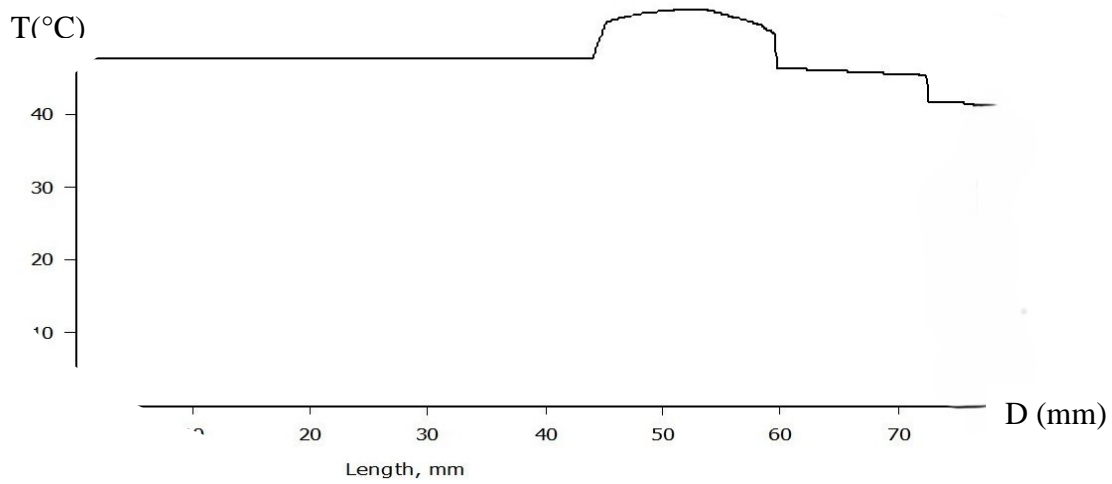


Figure III.9. Température en fonction de la distance du centre du moteur qui passe par l'encoche à vide en régime sain.

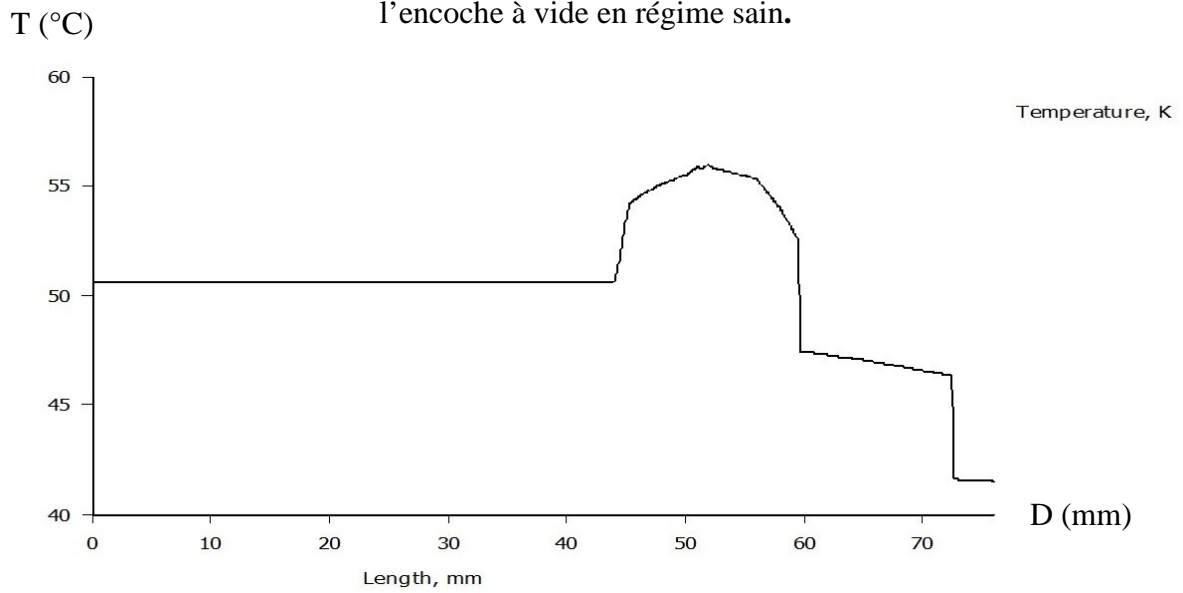


Figure III.10. Température en fonction de la distance du centre du moteur qui passe par l'encoche la moins chaude à vide en régime de défaut de coupure d'une phase

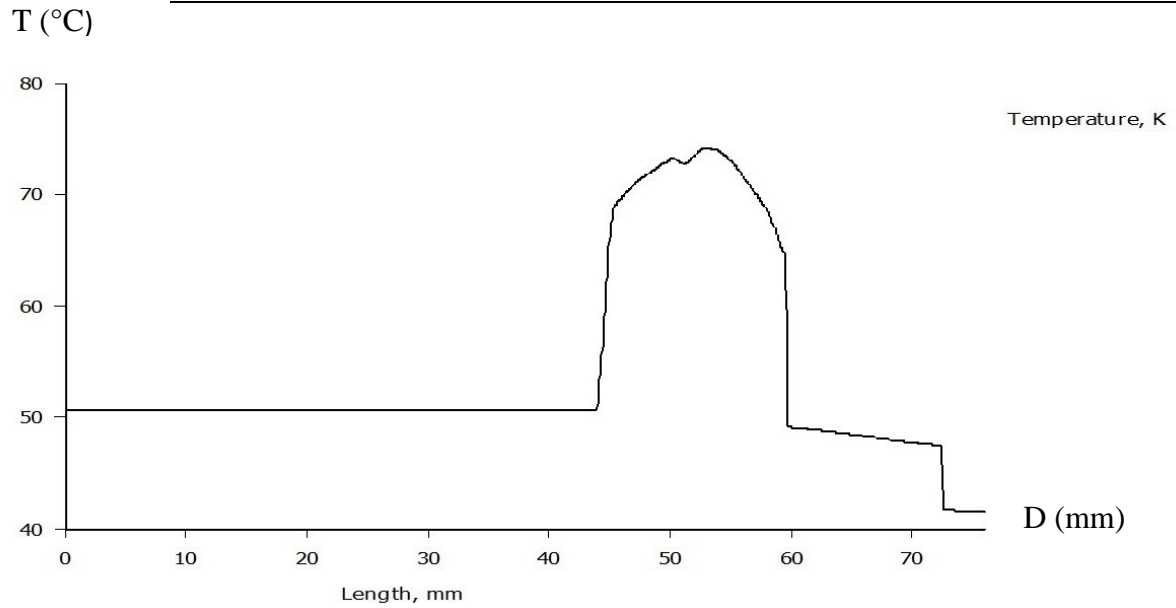


Figure III.11. Température en fonction de la distance du centre du moteur qui passe par l'encoche la plus chaude à vide en régime de défaut de coupure d'une phase.

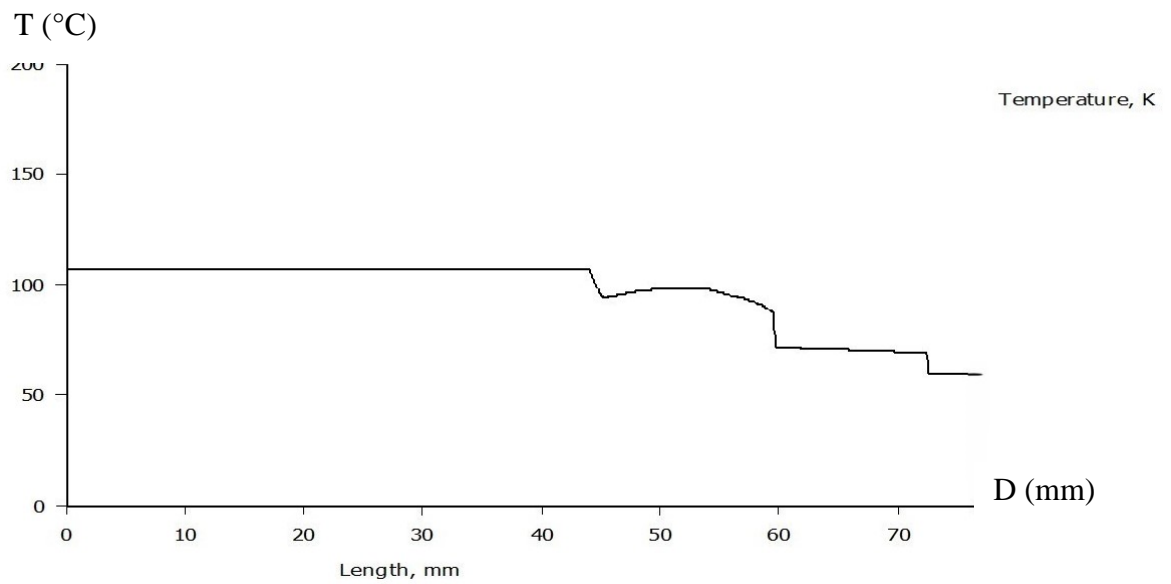


Figure III.12. Température en fonction de la distance du centre du moteur en charge nominale en régime sain.

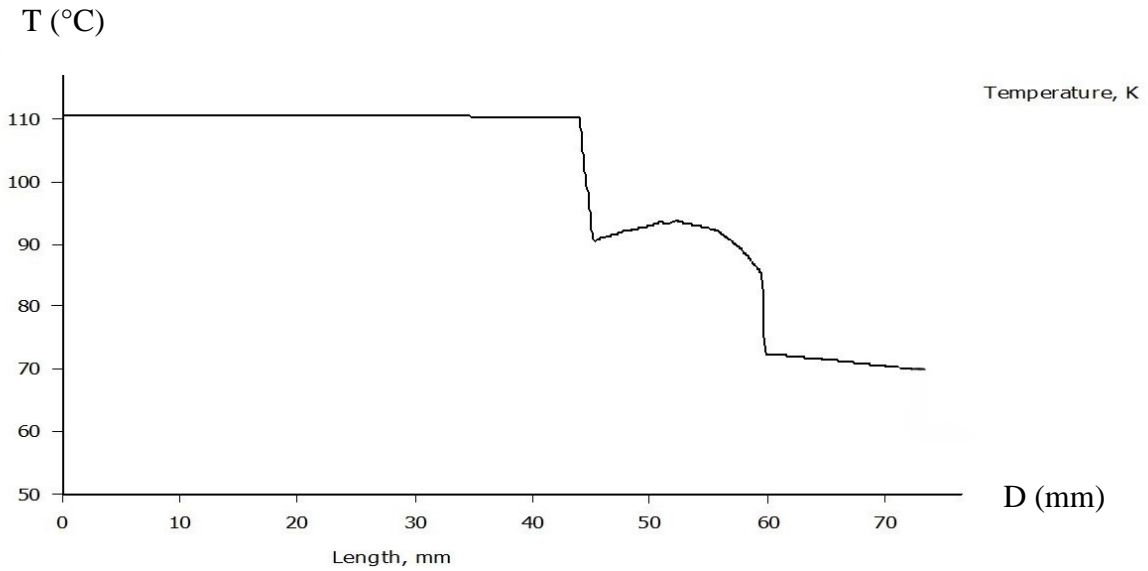


Figure III.13. Température en fonction de la distance du centre du moteur qui par l'encoche la moins chaude en charge nominale en régime de défaut de coupure d'une phase

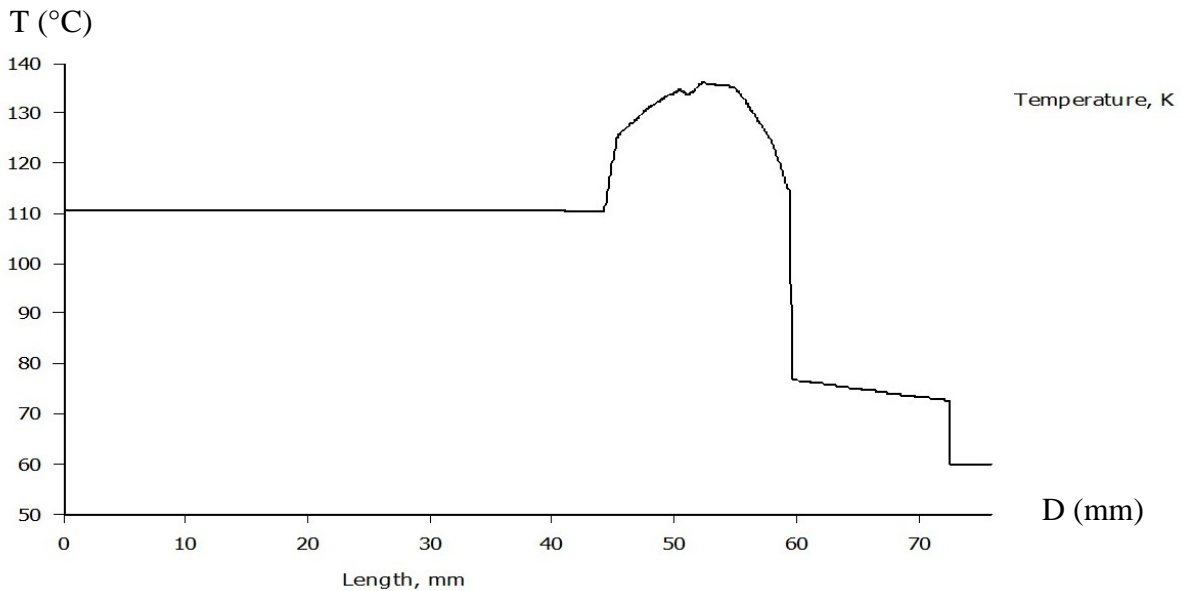


Figure III.14. Température en fonction de la distance du centre du moteur qui passe par l'encoche la plus chaude en charge nominale en régime de défaut de coupure d'une phase.

III.6.4. Analyse des résultats obtenus par la simulation :

En analysant les résultats obtenus par la simulation on peut remarquer :

1. **Rotor** : il semble que les températures du rotor soient élevées dans toutes les conditions de fonctionnement. En régime sain à vide, la température est de 47.7°C, mais en régime de défaut à vide, elle atteint 50.6°C.

En charge, la température augmente considérablement, atteignant 106.5°C en régime sain et 110.4°C en cas de défaut.

2. **Culasse** : la température de la culasse reste relativement basse par rapport aux autres zones.

En régime sain à vide, la température est de 46.11°C , tandis qu'en régime de défaut à vide, elle s'élève à 48.08°C .

En charge, la température augmente légèrement, atteignant 71.5°C en régime sain et 74.1°C en cas de défaut.

Cela indique, que la culasse est moins sensible au défaut par rapport aux autres zones du moteur.

3. **Dents statoriques** : la température des dents statorique sont élevées dans toutes les conditions de fonctionnement.

En régime sain à vide, la température est de 47.4°C , tandis qu'en régime de défaut à vide elle atteint 52.3°C entre les phases de défaut et atteint 48.7°C entre les deux autres phases.

En charge nominale, les températures continuent d'augmenter, atteignant 76.1°C en fonctionnement normal et 85.1°C entre les phases de défaut et 77.5°C entre les deux autres phases.

Les températures élevées dans les dents statoriques peuvent indiquer une influence directe du défaut et nécessitent une attention particulière.

4. **Interface** : les températures de l'interface apparaissent plutôt basses comparativement aux autres régions du moteur.

En régime sain à vide, la température est de 43.4°C , tandis qu'en régime de défaut à vide s'élève à 44.2°C

En charge nominale, la température augmente à 64.4°C en régime sain et 65.5°C en cas de défaut.

5. **Carcasse** : la température de la carcasse semble maintenir une stabilité relative dans toutes les conditions de fonctionnement, reste à 41.5°C à vide et 59.7°C en charge en régime sain ou en défaut (par hypothèse).

Une température constante peut suggérer une répartition uniforme de la chaleur et une ventilation adéquate.

6. **Entrefer** : les températures de l'entrefer semblent élevées dans toutes les conditions de fonctionnement.

En régime sain à vide, la température est de 47.7°C, tandis qu'en régime de défaut à vide, augmente à 50.6°C. En charge nominale, la température augmente à 92.2°C en régime sain et 93.3 °C en régime de défaut.

Des températures élevées dans l'entrefer pourraient signaler un transfert de chaleur inefficace ou des problèmes de refroidissement.

7. Encoche statorique : les températures des encoches statoriques sont également élevées, surtout en cas de défaut.

En régime sain à vide, la température est de 54.3°C, alors qu'en cas de défaut à vide, elle atteint 74.4 °C dans les encoches affectés et reste à 55.8°C dans les encoches saines.

En charge nominale en régime sain, la température est de 97.6 °C et en régime de défaut, elle augmente à 138.9°C dans les encoches affectés et 93.6 °C dans les encoches saines.

Ces températures élevées peuvent signaler une influence du défaut ou une ventilation insuffisante dans les encoches statoriques.

En conclusion, la présence d'un défaut de coupure d'une phase d'alimentation dans un moteur asynchrone triphasé a des répercussions importantes sur son modèle thermique, provoquant une hausse de la température, une réduction de la durée de vie et une baisse de l'efficacité énergétique.

III.7. Le maillage de la structure en deux couches

Le maillage s'effectue automatiquement sur le logiciel FEMM, il consiste à subdiviser la structure en des petits triangles, la structure en deux couches maillées est représentée dans la Figure III.15. Le maillage est plus fin dans l'entrefer et interface où les paramètres thermiques sont difficiles à identifier. Les conditions aux limites sont de type Dirichlet sur la surface extérieure de la carcasse.

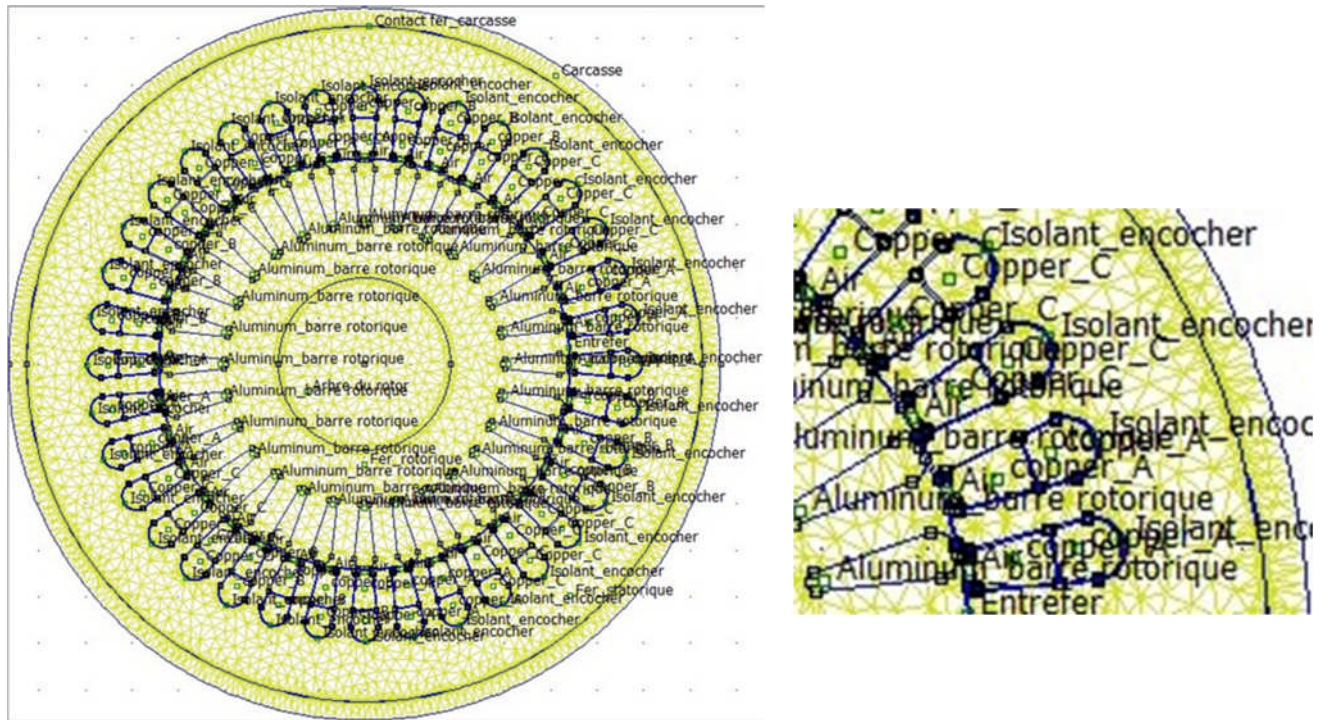


Figure.III.15 : Structure en deux couches maillées d'une coupe radiale avec et sans défaut.

III.8 Résultats de la simulation

III.8.1. Régime sain

III.8.1.1 Essai à vide

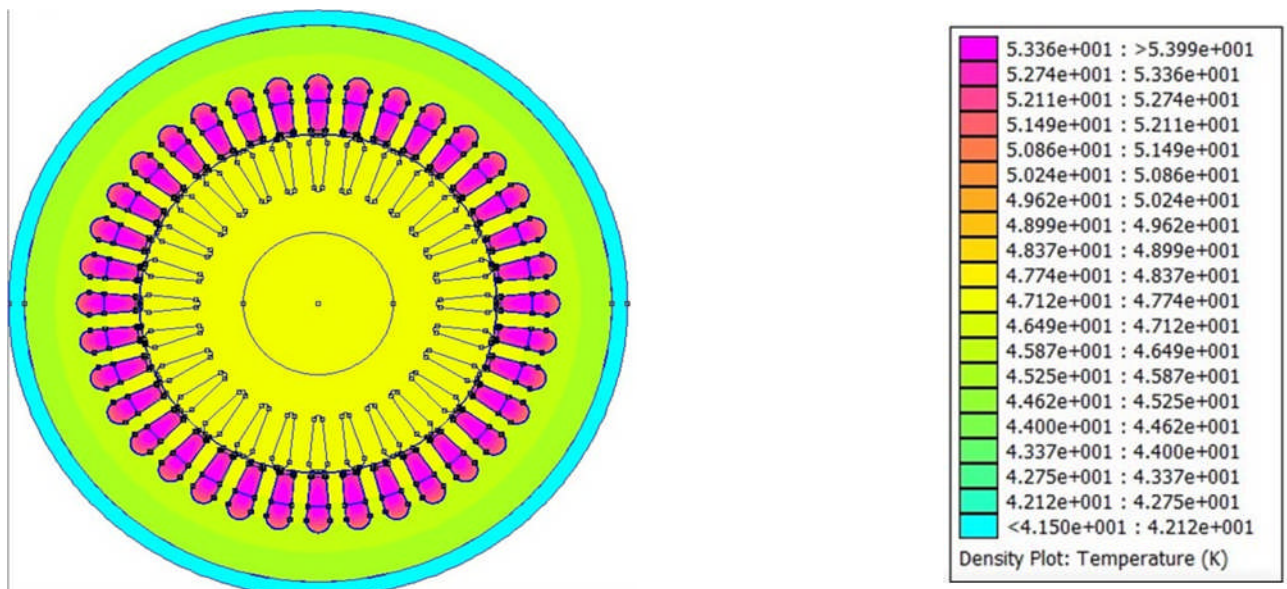


Figure.III.16 Répartition de la température à l'essai à vide sur une coupe radial à deux couches.

III.8.1.2 Essai en charge nominale

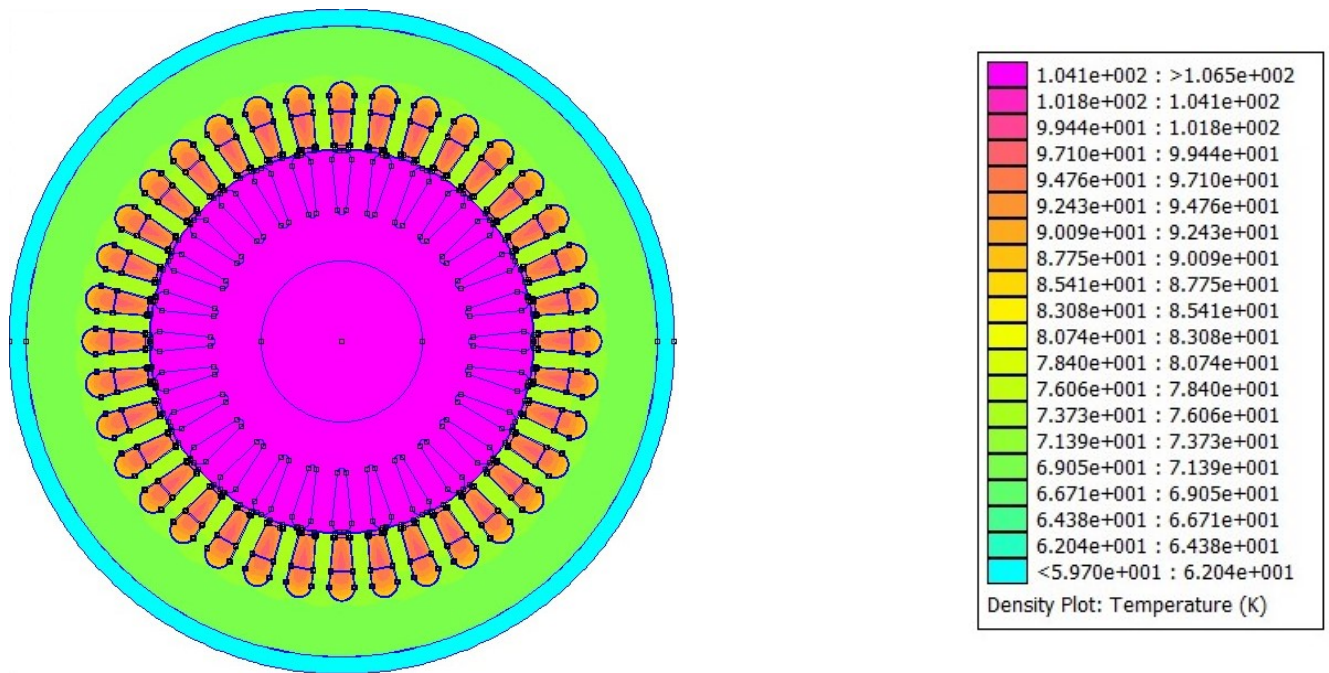


Figure III.17 : Répartition de la température dans l'essai en charge sur une coupe radiale en deux couches.

III.8.2. Régime de Défaut

III.8.2.1. Essai à vide

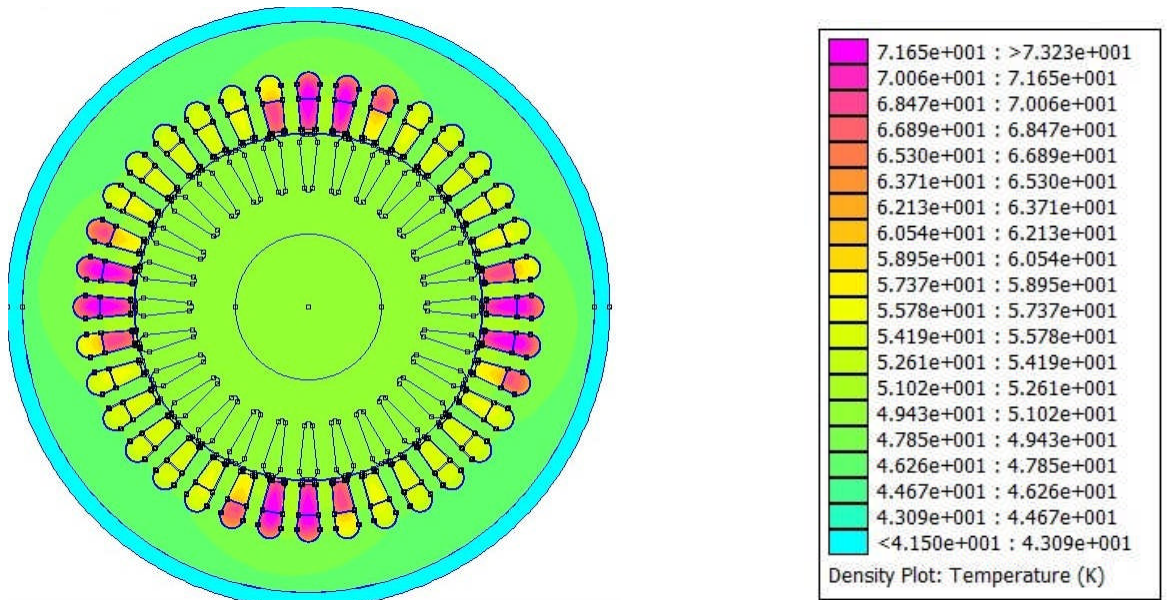


Figure III.18. Répartition de la température à l'essai à vide en présence de défaut de coupure d'une phase sur une coupe radiale en deux couches.

III.8.2.2. Essai En charge nominale

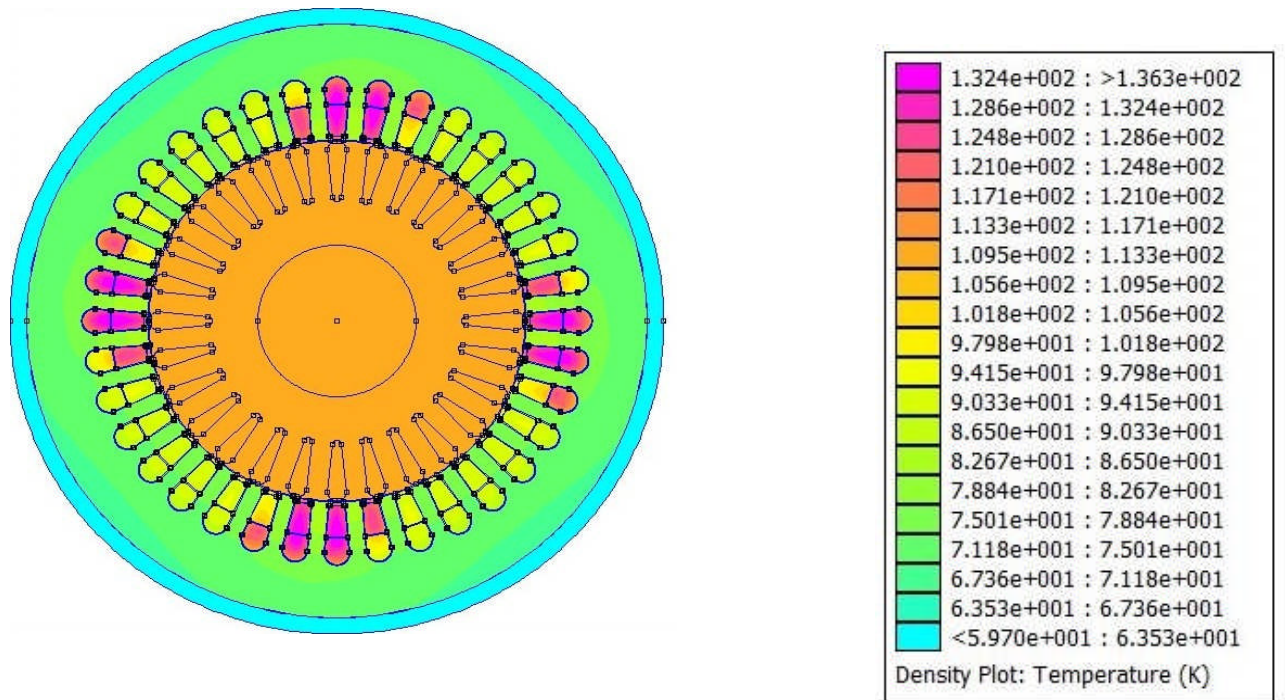


Figure III.19. Répartition de la température dans l'essai en charge en présence de défaut de coupure d'une phase sur une coupe radiale à deux couches.

III.8.3. Interprétation des résultats

D'après les figures (III.16, III.17, III.18, III.19) on peut observer la distribution de la température dans la machine électrique étudiée, les températures varient d'une région à l'autre et dépend de la densité de pertes et de la conductivité thermique des matériaux.

Le tableau suivant (III.6) montre les différentes valeurs de la température pour le cas de fonctionnement sélectionnés.

Tableau(III.6) : Les différentes valeurs de la température pour le cas de fonctionnement sélectionnés

Types d'essai Zones	A vide en régime sain	A vide en régime de défaut	En charge en régime sain	En charge en régime de défaut
Rotor	47.7°C	50.5°C	106.3°C	110.2°C
Culasse statoriques	46.1°C	48.02°C	71.4°C	74.02°C
Dent statoriques	47.4°C	52.2°C entre les phases de défaut 48.7°C entre les deux autres phase	75.9°C	84.8°C entre les phases de défaut 76.5°C entre les deux autres phases
Interface	43.4°C	44..18°C	64.4°C	65.4°C
Carcasse	41.5°C	41.5°	59.7°C	59.7°C
Entrefer	47.7°C	50.55°C	95.1°C	99.06°C
Encoches statoriques	53.9°C	73.2°C phase de défaut 55.6°C les deux autres phases	97.3°C	136.9°C phase de défaut 93.07°C les deux autres phases

Les figures (III.20, III.21, III.22, III.23), représentent les températures du moteur en fonction de la distance au centre du moteur pour les différentes situations.

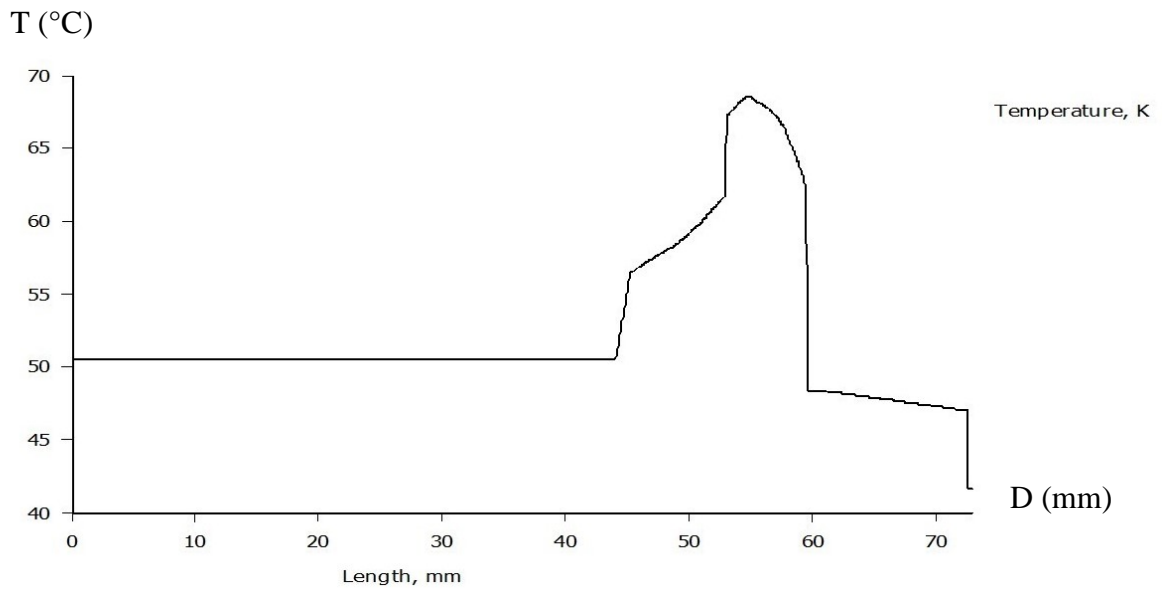


Figure III.20. Température en fonction de la distance du centre du moteur qui passe par l'encoche la moins chaude à vide en régime de défaut de coupure d'une phase

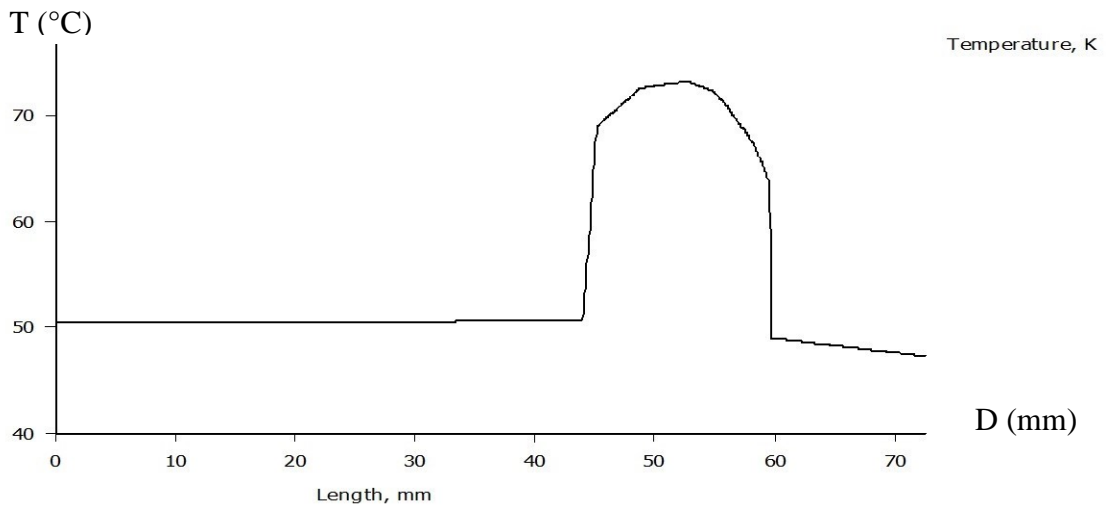


Figure.III.21 Température en fonction de la distance du centre du moteur qui passe par l'encoche la plus chaude à vide en régime de défaut de coupure d'une phase

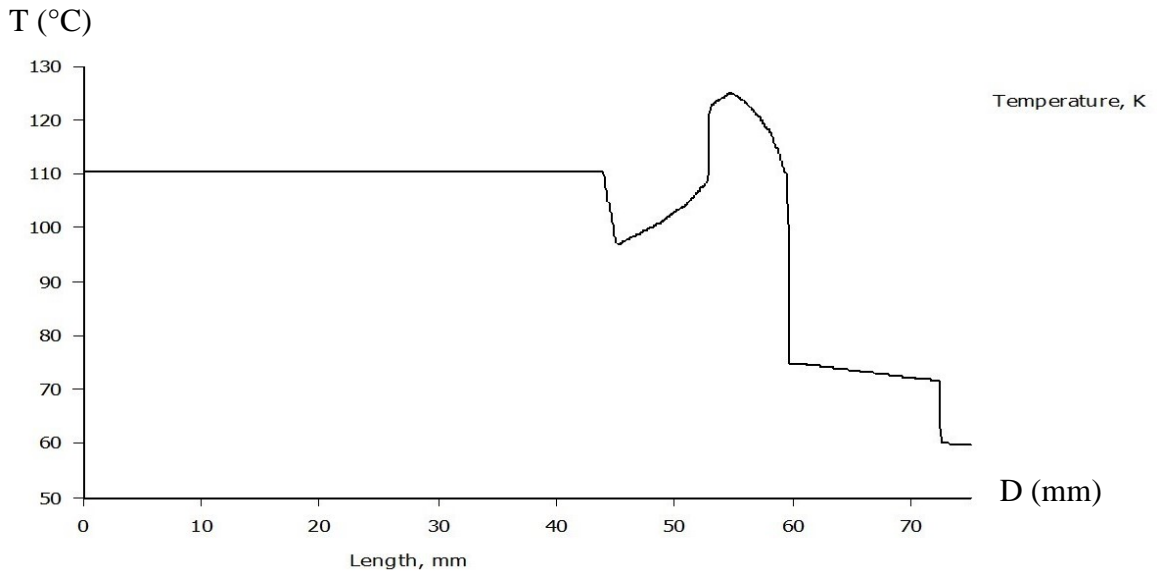


Figure III.22. Température en fonction de la distance du centre du moteur qui par l'encoche la moins chaude en charge nominale en régime de défaut de coupure d'une phase.

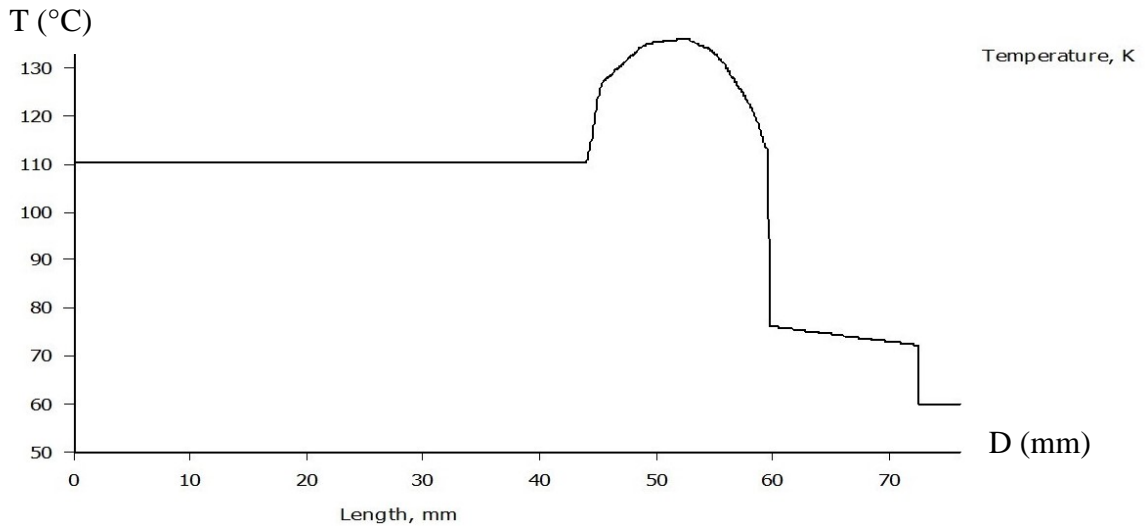


Figure III.23. Température en fonction de la distance du centre du moteur qui passe par l'encoche la plus chaude en charge nominale en régime de défaut de coupure d'une phase.

III.8.3.1. Analyse des résultats obtenus par la simulation :

En analysant les résultats obtenus par la simulation on peut remarquer :

1. Rotor : la température du rotor est élevée dans toutes les conditions de fonctionnement. À vide et en régime sain, la température est de 47.7°C, mais en régime de défaut à vide, elle atteint 50.5°C.

En charge, la température augmente de manière notable, atteignant 106.3°C en régime sain et 110.2°C en régime de défaut.

2. Culasse : la température de la culasse est relativement basse par rapport aux autres zones.

En régime sain à vide, elle est de 46.1°C et en régime de défaut à vide, elle augmente à 48.02°C .

En charge, la température augmente de 71.4°C en régime sain à 74.02°C en régime de défaut.

3. Dents statoriques : les températures des dents statoriques sont élevées dans toutes les conditions de fonctionnement.

En régime sain à vide, la température est de 47.4°C , tandis qu'en régime de défaut à vide, elle atteint 52.2°C entre les phases de défaut et 48.7°C dans les deux autres phases.

En charge nominale, les températures augmentent encore, atteignant 75.9°C en régime sain et 84.4°C entre les phases de défaut et 76.5°C sur les deux autres phases.

Des températures élevées dans les dents du stator peuvent être directement liées à un défaut et nécessitent une attention particulière.

4. Interface : les températures de l'interface semblent être moins élevées comparativement aux autres zones du moteur.

En régime sain à vide, la température est de 43.4°C , tandis qu'en régime de défaut à vide s'élève à 44.18°C .

En charge nominale, la température augmente à 64.4°C en régime sain et 65.4°C en régime de défaut.

Ces températures observées peuvent être un signe de transfert de chaleur efficace entre les différentes sections du moteur.

5. Carcasse : la température de la carcasse semble relativement stable dans toutes les conditions de fonctionnement, restent à 41.5°C à vide et 59.7°C en charge. (en régime de défaut)

Une température constante peut indiquer une bonne répartition de la chaleur et une ventilation adéquate.

7. Entrefer : les températures de l'entrefer sont élevées dans toutes les conditions de fonctionnement du moteur.

A vide en régime sain, la température atteint 47.7°C , tandis qu'en régime de défaut à vide, cette température monte à 50.55°C .

En charge nominale, la température augmente à 95.1°C en régime sain et à 99.06 °C en régime de défaut.

Des températures élevées observées dans l'entrefer pourraient signaler un mauvais transfert de chaleur.

8. Encoches statoriques : les températures des encoches statoriques sont élevées en particulier en régime de défaut.

En régime sain à vide, la température est de 53.9°C, tandis qu'en régime de défaut à vide elle atteint 73.2°C dans les encoches d'une phase de défaut et 55.6°C dans les encoches des autres phases.

En charge nominale en régime sain la température est de 99.06°C et en régime de défaut elle augmente à 136.9°C dans les encoches d'une phase de défaut et 93.07°C dans les deux autres encoches.

Ces températures élevées peuvent être le résultat d'un défaut ou d'une ventilation inadéquate dans les encoches du stator.

En conclusion, la défaillance de coupure d'une phase d'alimentation dans un moteur asynchrone triphasé a un impact significatif sur son modèle thermique.

Cela se traduit par une augmentation de la température, une réduction de sa durée de vie et des dommages significatifs au moteur.

III.8.4. Régime de surcharge

III.8.4.1. Régime sain

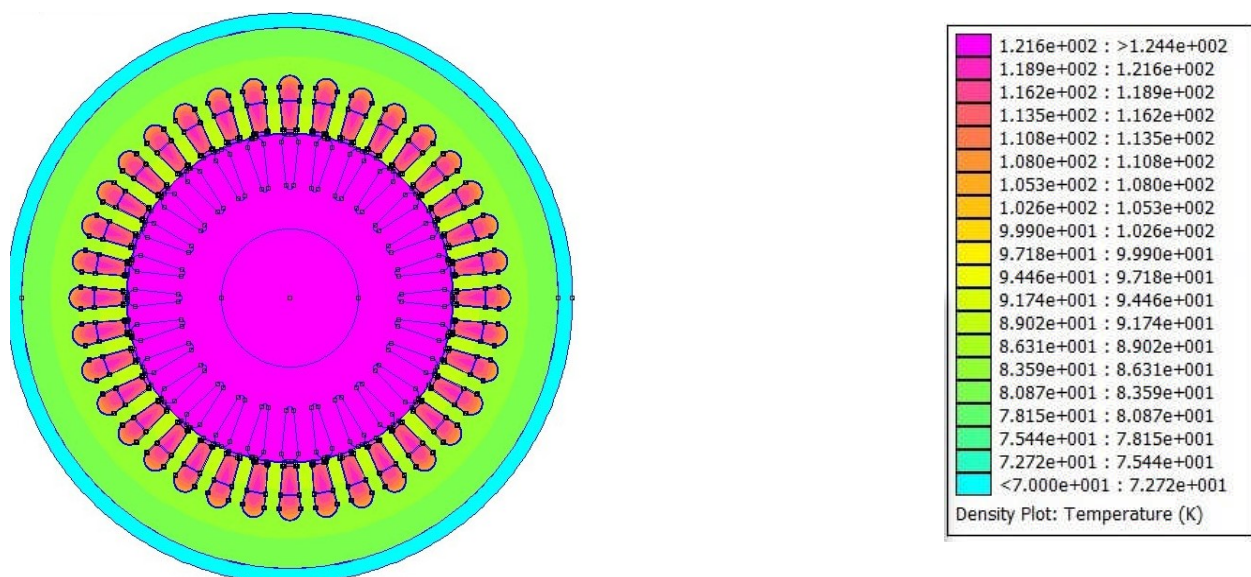


Figure III.24. Répartition de la température dans l'essai en surcharge en régime sain sur une coupe radiale à deux couches.

III.8.4.2. Régime de défaut de coupure d'une phase

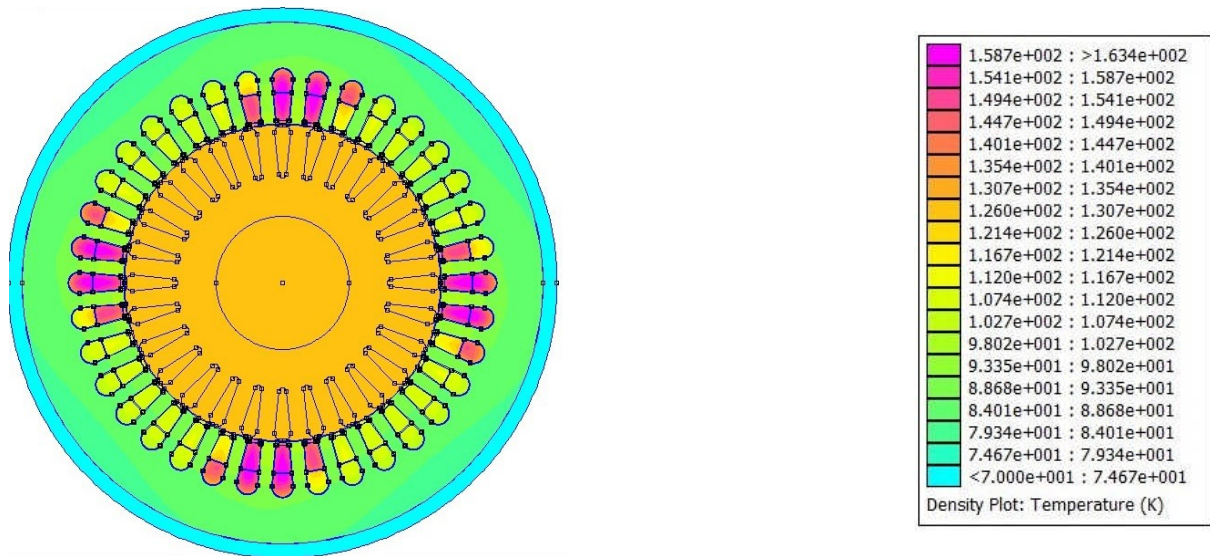


Figure III.25. Répartition de la température dans l'essai en surcharge en régime de défaut de coupure de phase sur une coupe radiale à deux couches.

III.8.5. Interprétation des résultats obtenus de la simulation en régime de surcharge

Les résultats obtenus dans les Figures (III.24 et III.25) montrent la répartition de la température dans la machine faisant l'objet d'étude.

Le tableau suivant (III.7) montre les différentes valeurs de la température pour les cas de fonctionnements sélectionnés.

Tableau III.7. Les valeurs de températures à l'essai en surcharge.

Essai Zones	En surcharge En régime sain	En surcharge En régime de défaut
Rotor	124.3°C	127.7°C
Culasse statorique	84.6°C	86.9°C
Dent statorique	90.4.1°C	99.8°C 1ere phase 89.2°C les deux autres phases en série
Interface	75.8°C	76.8°C
Carcasse	70.1°C	70.15°C
Entrefer	11.8°C	133.6°C
Encoche statorique	114.9°C	152.9°C 1ere phase 107.4°Ces deux autres phases en série

III.9. Comparaison entres les résultats expérimentaux et celles de FEMM

➤ Régime sain

- À vide

Tableau III.8. Comparaison entre les mesures expérimentales et par FEMM à vide.

Emplacement	Carcasse	Interface	Culasse	Encoche statorique	Dent statorique	Entrefer	Rotor
FEMM	41.5°C	43.4°C	46.1°C	53.36°C	51.49°C	50.24°C	47.7°C
Expérimentales	41.5°C	46.25°C	48.75°C	54.6°C	54.1°C	52.4°C	56.25°C

- En charge nominale

Tableau III.9. Comparaison entre les mesures expérimentales et par FEMM en charge.

Emplacement	Carcasse	Interface	Culasse	Encoche statorique	Dentstatorique	Entrefer	Rotor
FEMM	59.7°C	74°C	76°C	96°C	85°C	92.43°C	106.3°C
Expérimentales	59.7°C	75°C	80.1°C	98.5°C	94.5°C	90°C	104°C

Globalement les résultats de simulation sont assez proches des valeurs expérimentales. Ce qui nous permet de validé le modèle théorique et de pouvoir ainsi tester différentes situation que ce soit au régime sain ou en défaut. De même dans le cas d'un enroulement à une seule couche ou à deux couches.

III.9. Comparaison entre les résultats en une seule et deux couches

En analysant les résultats on peut remarquer :

En régime sain à vide et en charge, les résultats sont similaires pour la structure à une couche et à deux couches. En constate aussi que la concentration de la température est moindre lors d'un défaut de coupure d'une phase pour l'enroulement à deux couches par rapport à l'enroulement à une seule couche.

III.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation thermique de la machine asynchrone à cage, tant en état normal qu'en cas de défaut de coupure d'une phase. Pour trois régimes de fonctionnement à vide, en charge nominale et en surcharge dans deux cas (structure à une seule couche et à deux couches), [21].

L'étude thermique a été réalisée à l'aide du logiciel FEMM, qui utilise la méthode des éléments finis, cette étude vise à déterminer la répartition de la température dans les différentes parties de la machine. Les résultats de la simulation ont révélé que la machine à deux couches permet une dissipation thermique plus efficace, réduisant les risques de surchauffe localisée. Et le comportement thermique en cas de coupure d'une phase d'alimentation devient critique, entraînant une surchauffe excessive pouvant causer des dommages importants au moteur.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

La machine asynchrone est utilisée dans de nombreux domaines et évolue avec les avancées de l'industrie moderne.

L'étude du comportement thermique des machines électriques est essentielle, tant pour les constructeurs que pour les utilisateurs.

Dans cette étude, nous avons pour objectif de modéliser la température en régime permanent d'un moteur asynchrone à cage en cas de coupure d'une phase d'alimentation dans deux types d'enroulement (une couche et deux couches) en utilisant la méthode des éléments finis. Pour cela nous avons utilisé le logiciel FEMM (heat flow) pour résoudre les équations de la chaleur et adapter ces solutions au problème thermique de la machine.

Les essais ont démontré l'impact de la coupure d'une phase du moteur en fonctionnement à vide, en charge nominale et en surcharge sur son comportement thermique. Les résultats montrent que ce défaut entraîne des pertes supplémentaires, ce qui se traduit par une augmentation de la température dans différentes parties de la machine.

Cette étude de la modélisation thermique permet de conclure que les prévisions obtenues pour les régimes avec défaut de coupure de phase dans les moteurs asynchrones sont significatives et la distribution de la température est meilleure dans la structure en deux couches.

En constate donc que la concentration de la température est moindre lors d'un défaut de coupure d'une phase pour l'enroulement à deux couches par rapport à l'enroulement à une seule couche.

Ces moteurs ne sont généralement pas conçus pour fonctionner dans de telles conditions, et la surchauffe qui en résulte n'est pas prévue dans leur classification ou leur conception,[21]. Cela explique en partie pourquoi certains moteurs sont déclassés avant la fin de leur durée de vie.

Perspectives

L'amélioration du modèle nécessite de prendre en compte les pertes joules dans le rotor et les pertes magnétiques en régime de défaut qui se répartissent différemment dans les encoches du rotor et le circuit magnétique. Cela implique l'utilisation du circuit équivalent de la machine asynchrone pour identifier et valider ses paramètres. En utilisant les équations électriques de ce schéma, il est possible de déterminer les courants statorique, rotorique et magnétisant, ce qui permet ensuite de calculer les pertes correspondantes.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] **MELLAL A. et AMMAR K.**, « Dimensionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil », Mémoire de fin d'étude de master académique UMMTO, 2012.
- [2] **Abed A.**, « Contribution à l'étude et au diagnostic de la machine asynchrone », Thèse de doctorat, université de Henri Poincaré, Nancy-1, Mars 2002.
- [3] **TABOU A. et OUGHACHA M.**, « Evaluation des pertes fer dans une machine asynchrone à cage », Mémoire de Fin d'étude de master académique UMMTO, 2016.
- [4] **CHEVALIER Thierry.**, « Modélisation et mesure des pertes fers dans les machines électrique application à la machine asynchrone », thèse pour obtenir le grade de DOCTEUR DEL'INPG',1999.
- [5] **KHATIR A.**, « Etude comparative des modèles des MAS utilisé en diagnostic des pannes », Mémoire de magister, université Ferhat Abbas, Sétif, 2008.
- [6] **CHEAYTANI J.**, « Calcul par éléments finis des pertes supplémentaires dans les motorisations performances », Thèse de Doctorat, Université de Lille1, 2016.
- [7] **SAINTMICHEL JAQUES.**, « Bobinage des machines tournantes à courant alternatif », Techniques de l'ingénieur »,2022.
- [8] **BAZINE S.**, « Conception et implémentation d'un Méta –Modèle de machines asynchrones en défaut », Thèse de doctorat, Laboratoire d'Automatique et d'Informatique industrielle(LAIL)-EA 1219, université de Poitiers, 2009.
- [9] **DIDIER Gaetan.**, « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I.
- [10] **Boussaid A. et Bouzouar A. et Seghir M.**, “Modélisation des contraintes thermiques d'un moteur asynchrone à cage sous FEMM », Mémoire de Fin d'Etude, UMMTO, 2011.
- [11] **MEZANI SMAIL.**, « modélisation thermique d'un moteur asynchrone à cage » mémoire de magister, université des sciences et technologie Houari Boumediene (Alger) ,1999.
- [12] **IFREK H. et HAOUCHINE T.**, « Etude thermique d'un moteur asynchrone à cage », université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2011.
- [13] **ABDELLI M. et CHABANE M.**, « essais d'échauffement d'un moteur asynchrone triphasé à cage », Mémoire de DEUA, université de Mouloud Mammeri (Tizi Ouzou) ,2009.
- [14] **KADI Hakim. Et ABBAS Abdelghani.**, « Modélisation et mesure thermique d'un moteur asynchrone sous différentes sources d'alimentation », Mémoire de Fin d'Etude, U.M.M.T.O, 2018.
- [15] **Razik Hubert.**, « Le contenu spectral du courant absorbé par la machine asynchrone en cas de défaillance, un état de l'art, Green-UHP, Faculté des sciences Revue 3EI n°29, juin, 2002.

- [16] **A H Bonnett. et G C SOUKUP.**, « Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-phase squirrel-cage induction motors “IEEE trans on industry Applications, vol 28,No ,July/August 1992,PP.921-937,1992.
- [17] **BOUZID M. et CHAMPENOIS G.**,”An Efficient, Simplified Multiple-coupled circuit Model of the Induction Motor to simulate Different types of stator Faults”, Elsevier, Journal of Mathematics and computers in simulation , Vol.90,PP.98.
- [18] **BOUGRAB Massinissa. et SAFIR Yacine.**, « Réalisation d’un dispositif de mesure de la température rotorique d’un moteur asynchrone », Mémoire de Fin d’étude, UMMTO, 2018.
- [19] **BASSAD A., BOUZOUAR A. et SEGHIR M.**,« Modélisation des contraintes thermiques d’un moteur asynchrone à cage sous FEMM », Mémoire de master académique, UMMTO, 2010.
- [20] **DAHMANI M. et CHERGUI T.**, « Modèle thermique d’un moteur asynchrone en présence d’un défaut de coupure d’une phase », Mémoire de fin d’études de master académique, UMMTO,2023.
- [21] **TADBIRT N. et TAYEBI T.**,« Relevés et modélisation thermique d’un moteur asynchrone à cage sous différentes sources d’alimentation », mémoire de master académique, université Mouloud Mammeri, 2019.

ANNEXE

Tableau A.1.Caractéristiques nominales de la machine étudiée.

Caractéristiques	Valeurs	Unités
Puissance utile	2.2	KW
Nombre de phases	3	-
Fréquence d'alimentation	50	HZ
Vitesse de rotation de champ tournante	1500	Tr/min
Glissement	4.66	%
Tension d'alimentation	380	V
Connexion des enroulements	Triangle (Δ)	-
Courant absorbé nominal	5.2	A
Facteur de puissance	0.83	-
Rendement	78	%
Résistance d'une phase au stator (26°C)	8.67	Ω
Hauteur d'axe	100	Mm
Couple nominal	15	N.m

Tableau A.2.Dimensions de la carcasse.

Composante	Valeur	Unité
Diamètre extérieur	153	Mm
Diamètre intérieur	145	Mm
Longueur axiale	192	Mm
Nombre d'ailette	40	Mm
Hauteur d'ailette	20	Mm
Distance entre deux ailettes	10	Mm

Tableau A.3. Dimensions du stator.

Composante	Valeur	Unité
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 d'encoche	96.4	<i>mm</i> ²
Epaisseur de caniveau d'encoche	0.225	Mm
Nombre de brins actifs par encoches	64	-
Diamètre du conducteur nu	0.71	Mm
Diamètre du conducteur isolé	0.753	Mm
Section de cuivre dans l'encoche	25.34	<i>mm</i> ²
Epaisseur de l'entrefer	0.25	Mm
Classe d'isolation	F	-

Tableau A.4. Dimensions du rotor.

omposante	Valeur	Unité
Diamètre extérieur	88	Mm
Diamètre extérieur de la culasse	57.75	Mm
Diamètre de l'arbre	37	Mm
Longueur axiale	110	Mm
Nombres d'encoches	28	-
Section de l'encoche	45.33	<i>mm</i> 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	-
---	---	---

Caractéristiques des enroulements :

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

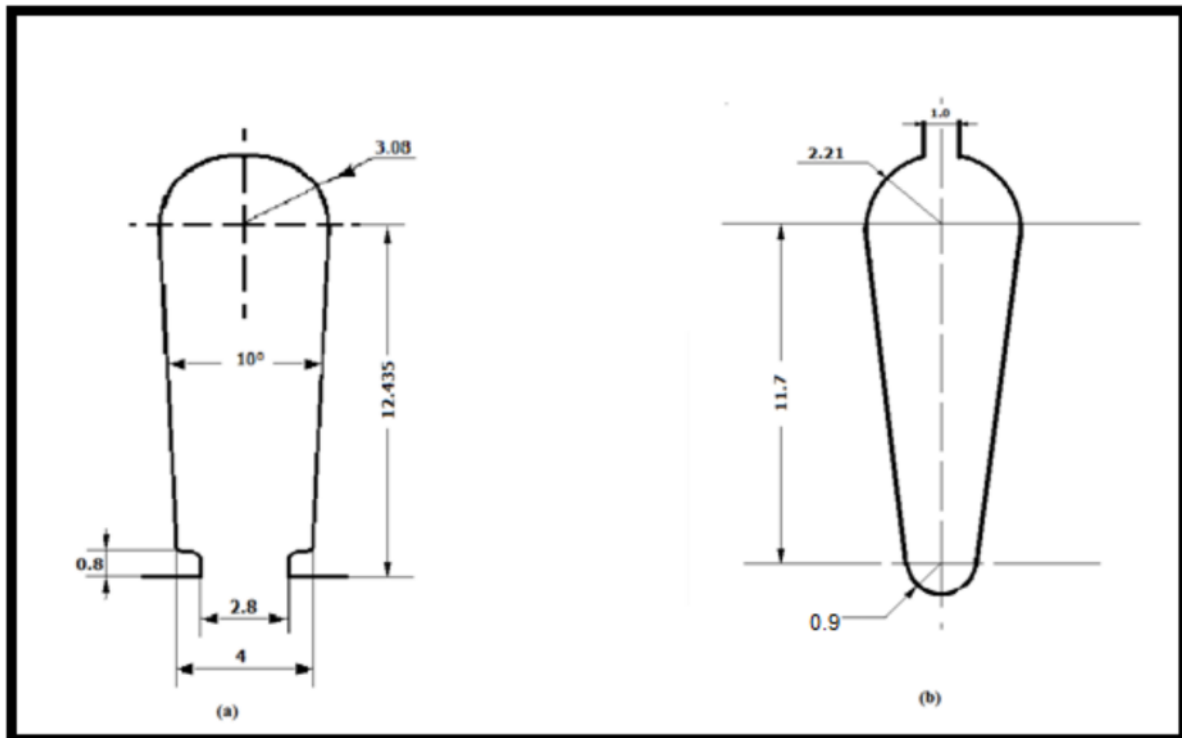


Fig. A.1. Formes et dimensions des encoches.

(a) Encoche statorique, (b) Encoche rotorique

I. Calcul des pertes dans les différentes parties de la machine en régime sain

Calcul des pertes Joule statorique

➤ En charge nominale

$$PJS = 3.RS (115^\circ).I^2$$

$$RS(115^\circ) = RS (26^\circ) \frac{115+235}{26+235} = 8,67.1,34 = 11.62\Omega.$$

$$PJS = 3.11,62. \left(\frac{5.01}{\sqrt{3}}\right)^2 = 291,66W$$

➤ A vide

$$PJS0 = 3.RS (60.4^\circ).I^2$$

$$RS(60.4^\circ) = RS (26^\circ) \frac{60.4+235}{26+235} = 8,67.1,13 = 9.81\Omega.$$

$$PJS = 3.9,81. \left(\frac{3}{\sqrt{3}}\right)^2 = 88.31W$$

Séparations des pertes Joule dans le bobinage statorique

Les pertes Joules statorique se situent dans les têtes debobines et l'enroulement dans les encoches.

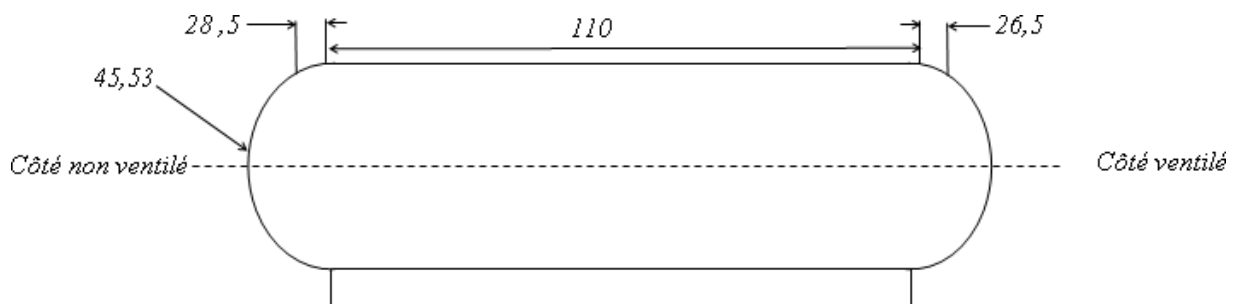


Fig.B.1 Dimensions des têtes de bobine.

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

➤ **Côté non ventilé**

$$L_{bnv} = (45,553 * \pi) - (2*(45.553-28.5)) = 109\text{mm}$$

➤ **Côté ventilé**

$$L_{bv} = (45,553 * \pi) - (2*(45.553-26.5)) = 105\text{mm}$$

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

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

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

➤ **Dans l'encoche statorique**

$$P_{enc} = P_{JS} * (110/434) = 0,507 * P_{JS}$$

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

$$P_{bv} = P_{JS} * (105/434) = 0,242 * P_{JS}$$

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

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

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

➤ **A vide**

$$P_{enc} = 0,507 * 88,31 = 44,77\text{W}$$

$$P_{bv} = 0,242 * 88,31 = 21,37\text{W}$$

$$P_{bnv} = 0,251 * 88,31 = 22,16\text{W}$$

➤ **En charge**

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

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

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

• **Calcul des pertes fer statorique**

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

$$P_f = 147,32 \quad (\text{avec pertes mécaniques constants } P_{mec} = 32W).$$

$$P_f = 115W$$

• **Calcul des pertes Joule rotorique en charge nominale**

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

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

Avec :

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

g : Le glissement.

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

N : La vitesse mécanique (tr/min).

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

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{1500 - 1414}{1500} = 5,7\%$$

• **Fonctionnement à vide :**

Les pertes Joule rotorique dans l'essai à vide sont très minimes (proche de 0), donc on peut les négliger.

$$P_{jr} = 0W$$

Calcul du volume des différents éléments de la machine

• **Le volume du cuivre au niveau des encoches**

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

Avec :

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

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

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

• **Volume du cuivre dans les têtes des bobines**

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

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

- **Le volume des tôles statorique**

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

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

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

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

$$V_3 = a * c * L = 277,2 \text{ mm}^3$$

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

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

- **Calcul du volume de cylindre creux**

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

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

Alors le volume des tôles statorique est le suivant :

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

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

- **Le volume de l'Aluminium dans la cage rotorique :**

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

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

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

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

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

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

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

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

Calcul des densités de pertes dans les différentes parties du moteur au régime sain

➤ En charge nominale

- Calcul des densités de pertes au niveau des encoches

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

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

$$D_{enc} = \frac{147.89}{1,0036224 \cdot 10^{-4}}$$

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

- Calcul des densités des pertes dans les tôles statorique

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

- Calcul des densités des pertes dans les encoches rotoriques

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

$$V_{Alu} = 2$$

$$V_{ann} +$$

$$V_{tbar}$$

$$D_{enc} = \frac{120.97}{2,47 \cdot 10^{-4}}$$

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

➤ A vide

- Calcul de la densité de pertes au niveau des encoches

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

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

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

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

- **Calcul des densités de pertes dans les tôles statorique**

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

- **Calcul de densité de pertes dans les encoches rotorique**

$$D_{enc} = 0 \text{ W}$$

II. Calcul des pertes et de la densité de pertes avec coupure d'une phase

➤ A VIDE

Dans la phase de défaut

$$P_{J_{s1}} = R_s * (I)^2$$

$$P_{J_{s1}} = 8,67 * (3,3)^2 = 94,4163 \text{ W}$$

Dans les deux autres phases

$$P_{J_{s2}} = R_s * (I)^2$$

$$P_{J_{s2}} = 8,67 * (1,9)^2 = 31,2987 \text{ W}$$

➤ En charge

Le courant de ligne est de 3,17

✓ Dans la phase de défaut augmente de 47,98 %

✓ Dans les deux autres phases diminue de 14,87 %

Ce qui donne les nouveaux courants comme suit

Pour une phase

$$3,17 \text{ ----- } 100\%$$

$$I_s \text{ ----- } 47,98\%$$

$$I_s = 47,98 * 3,17 / 100 \quad I_s = 1,53 \text{ A}$$

Donc

$$I_{s1} = 3.17 + 1.53 \quad I_{s1} = 4.7 \text{ A}$$

Pour les deux autres phases en série

$$3.17 \text{ ----- } 100\%$$

$$I_s \text{ ----- } 14,87\%$$

$$I_s = 14,87 * 3.17 / 100 \quad I_s = 0,47$$

Donc

$$I_{s2} = 3.17 - 0.47 \quad I_{s2} = I_{s3} = 2.7 \text{ A}$$

Les pertes Joule en charge sont comme suit

Pour une phase

$$P_{Js1} = R_s * (I)^2$$

$$P_{Js1} = 10,5 * (4,7)^2 \quad P_{Js1} = 231,945 \text{ W}$$

Les deux autres phases

$$P_{Js2} = P_{Js3} = R_s * (I)^2$$

$$P_{Js2} = P_{Js3} = 10,5 * (2,7)^2 \quad P_{Js2} = P_{Js3} = 76.545 \text{ W}$$

➤ **A vide :**

Pour une phase

$$P_{enc} = 0,507 * 94,4163 = 47,86 \text{ W}$$

$$P_{bv} = 0,242 * 94,4163 = 22,84 \text{ W}$$

$$P_{bnv} = 0,251 * 94,4163 = 23,69 \text{ W}$$

En charge :

$$P_{enc} = 0,507 * 231,945 = 117.59 \text{ W}$$

$$P_{bv} = 0,242 * 231,945 = 56.13 \text{ W}$$

$$P_{bnv} = 0,251 * 231,945 = 58,21 \text{ W}$$

pour les deux autres phases

$$P_{enc} = 0,507 * 31,2987 = 15,86 \text{ W}$$

$$P_{bv} = 0,242 * 31,2987 = 7,57 \text{ W}$$

$$P_{bnv} = 0,251 * 31,2987 = 7,85 \text{ W}$$

$$P_{enc} = 0,507 * 76.545 = 38.80 \text{ W}$$

$$P_{bv} = 0,242 * 76.545 = 18,52 \text{ W}$$

$$P_{bnv} = 0,251 * 76.545 = 19,21 \text{ W}$$

Calcul du volume des différents éléments de la machine

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

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

Avec :

$$L_{enc} = 84.48m$$

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

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

➤ **Le volume du cuivre au niveau d'une phase**

$$V_{1ph} = V_{enc} / 3$$

$$V_{1ph} = 1,0036224 * 10^{-4} m^3 / 3$$

$$V_{1ph} = 0,000033454 m^3$$

• **Calcul de la densité de pertes au niveau des encoches**

➤ **A vide**

$$D_{enc} = \frac{P_{jsenc}}{V_{cu\ 1ph}}$$

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

Pour une phase

$$D_{enc} = \frac{47,86}{0,000033454}$$

$$D_{enc} = 1430621,151 W / m^3$$

Pour les deux autres phases

$$D_{enc} = \frac{15,86}{0,000033454}$$

$$D_{enc} = 474083,8166 W / m^3$$

➤ **En charge**

$$D_{enc} = \frac{P_{jsenc}}{V_{cu\ 1ph}}$$

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

Pour une phase

$$D_{enc} = \frac{117,59}{0,000033454}$$

$$D_{enc} = 3514975,788 \text{ W / m}^3$$

Pour les deux autres phases

$$D_{enc} = \frac{38,80}{0,000033454}$$

$$D_{enc} = 1159801.519 \text{ W / m}^3$$

1. calcul des densités de pertes en surcharge

➤ régime sain

on a $I_s = 3.48$ et la résistance $R_s = 10.8$

Calcul de pertes Joule statorique

$$p_{js} = 3 * R_s * (I)^2$$

$$p_{js} = 3 * 10.8 * (3.48)^2 \quad p_{js} = 392.37696 \text{ W}$$

les pertes Joule statorique total :

$$P_{enc} = 0.507 * 392.37696 = 198.93 \text{ W}$$

Calcul de pertes Joule rotorique

- Calcul des pertes fer statoriques

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

$$P_f = 147 - 32 \quad (\text{avec perte mécaniques est constant } P_{mec} = 32 \text{ W}).$$

$$P_f = 115 \text{ W}$$

- Calcul des pertes Joule rotorique en charge nominale :

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

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

Avec :

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

g : Le glissement.

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

N : La vitesse mécanique (tr/min).

$$P_{tr} = P_a - (P_{js} + P_{fer}) = 2840.70 - (392.37 + 115) = 2333.33 \text{ W}$$

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

$$P_{jr} = g * P_{tr} \quad P_{jr} = 0.057 * 2333.33 = 133 \text{ W}$$

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

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

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

$$D_{enc} = \frac{198,96}{1,0036224 \cdot 10^{-4}}$$

$$D_{enc} = 1982423,626 \text{ w / m}^3$$

- **Calcul des densités des pertes dans les encoches rotorique**

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

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

$$D_{enc} = \frac{133}{2,47 \cdot 10^{-4}}$$

$$D_{enc} = 538461.5385 \text{ W / m}^3$$

➤ **Régime de défaut de coupure d'une phase d'alimentation**

Le courant de ligne est de 3,48 (surcharge 10%)

- ✓ Dans la première phase le courant augmente de 47.98 %,
- ✓ Dans les deux autres phases il diminue de 14,87 %,

Ce qui donne les nouveaux courants comme suit :

Pour la première phase :

$$3,48 \text{ ----- } 100\%$$

$$I_s \text{ ----- } 47,98\%$$

$$I_s = 47,98 * 3,48 / 100 \quad I_s = 1,66 \text{ A}$$

Donc

$$I_{s1} = 3,48 + 1,66 \quad I_{s1} = 5,14 \text{ A}$$

Pour les deux autres phases :

$$3,48 \text{ ----- } 100\%$$

$$I_s \text{ ----- } 14,87\%$$

$$I_s = 14,87 * 3,48 / 100 \quad I_s = 0,51$$

Donc

$$I_{s2} = 3,48 - 0,51 \quad I_{s2} = I_{s3} = 2,97 \text{ A}$$

Les pertes Joule en charge sont comme suit :

Première phase

$$P_{Js1} = R_s * (I)^2$$

$$P_{Js1} = 10,8 * (5,14)^2 \quad P_{Js1} = 285,33 \text{ W}$$

Les deux autres phases

$$P_{Js2} \text{ et } P_{Js3} = R_s * (I)^2$$

$$P_{Js2} \text{ et } P_{Js3} = 10,8 * (2,97)^2 \quad P_{Js2} = P_{Js3} = 95,26 \text{ W}$$

Première phase

$$P_{enc} = 0,507 * 285,33 = 144,66 \text{ W}$$

$$P_{bv} = 0,242 * 285,33 = 69,04 \text{ W}$$

$$P_{bnv} = 0,251 * 285,33 = 71,61 \text{ W}$$

Pour les deux autres phases

$$P_{enc} = 0,507 * 95,26 = 48,29 \text{ W}$$

$$P_{bv} = 0,242 * 95,26 = 23,05 \text{ W}$$

$$P_{bnv} = 0,251 * 95,26 = 23,91 \text{ W}$$

Calcul du volume des différents éléments de la machine

➤ Calcul de la densité de pertes au niveau des encoches

$$D_{enc} = \frac{P_{jsenc}}{V_{cu \text{ 1ph}}}$$

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

Pour la première phase

$$D_{enc} = \frac{144,66}{0,000033454}$$

$$D_{enc} = 4324146,589 \text{ W} / \text{m}^3$$

Pour les deux autres phases

$$D_{enc} = \frac{48.29}{0,000033454}$$

$$D_{enc} = 1443474,622 \text{ W / m}^3$$