

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES



Faculté de Technologie

Département d'Ingénierie des Systèmes Electriques

Mémoire de Master

Présenté par

Mlle. HAMZAOUI Bouchra

Mlle. ATMANI Kahina

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machines Electriques

Dimensionnement thermique d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil

Soutenu le 12 / 07/2022 devant le jury composé de :

M'ZIOU	Nassima	Professeur	UMBB	Président
HAMEL	Meziane	MCA	UMBB	Promoteur
HIMRANE	Nabil	MCA	UMBB	Co-Promoteur
ABDESLAME	Djamila	MCB	UMBB	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023



Remerciements

Remerciements

Avant tout, nous voudrions remercier Dieu qui nous a donné la force tout le temps et la santé et qui nous a sauvés toutes ces longues années.

Nous tenons à remercier notre promoteur Monsieur Hamel Meziane, MCA à l'UMBB, qui nous a éclairées tout au long de notre travail avec ses précieux conseils et ses encouragements illimités, ainsi que pour la documentation qu'il a mise à notre disposition.

Nous tenons également à remercier notre Co-promoteur, Mr. Himrane Nabil, MCA à l'UMBB de nous avoir aidés et encouragés, ainsi que sa grande disponibilité, à nous diriger.

Merci à Madame Hadjaz Sadia ainsi qu'à Monsieur BENACER Mohand Ouamar, Ingénieurs à l'entreprise Electro-Industries, de nous avoir encadrées au sein de l'entreprise, Nous tenons à la remercier pour leur soutien continu et leur grande disponibilité pour nous diriger. On se souvient de leurs conseils et orientations pour bien suivre toutes les étapes de fabrication des moteurs asynchrones. Sans oublier de remercier tous le personnel de l'Électro-Industries qui nous a beaucoup aidées.

Nos vifs remerciements vont à Madame M'ZIOU Nassima de nous avoir fait l'honneur de présider le jury de notre soutenance.

Nous remercions aussi, à Madame ABDESLAME Djamila, MCB à l'UMBB, pour avoir accepté d'examiner notre travail.

Dédicaces

Dédicaces

C'est avec une grande fierté et un immense amour, je dédie ce modeste travail :

À celle qui est la prunelle de mes yeux, celle qui a été mon guide et ma source de bonheur, celle qui a éclairé mon chemin par son soutien et son amour inconditionnel... à ma moitié, ma mère Ghania.

A celui qui a été mon pilier, à celui qui a utilisé toutes ses forces pour me pousser et m'élever dans les sphères du savoir et de l'excellence, à ma source d'effort et d'amour, mon cher père Azeddine.

À ma source de sécurité, à ceux qui m'ont entouré de leurs amours, leurs soutiens et de leurs encouragements, à ceux qui ont été mes plus grands héros et mes meilleurs amis, mes précieux frères : Khaled et Mohamed El Amine

À la famille HAMZAOUI et ATTOUCHI, je suis honoré de vous avoir à mes côtés.

À mes chères amies votre présence, votre soutien indéfectible et votre amitié ont été des sources d'inspiration inestimables tout au long de ce parcours. Votre amitié précieuse a illuminé chaque étape de cette expérience et a rendu ce chemin plus doux.

À mon ange ma chère binôme ATMANI Kahina pour sa patience, de son amour, et de son soutien inconditionnel tout au long de notre parcours ensemble.

Bouchra

Dédicaces

Je tiens c'est avec grande plaisir que je dédie ce modeste travail :

A l'être le plus chère de ma vie, à celle qui a souffert, sans me faire souffrir son sourire est la vie et son contentement est le but, ma mère, que Dieu te protège

A celui qui m'a appris à donner sans attendre, à celui dont je porte leur nom avec fierté, mon chère père, que Dieu te protège

A mes chères frères et sœurs, pour votre soutien inconditionnel. J'espère qu'avec ses quelques paroles pleines d'humilité je vous exprime suffisamment ma gratitude.

A toute la famille ATMANI, ceux qui m'ont toujours aidée et encouragée.

Mes amis et camarades d'étude qui sont toujours à mes côtés, et toutes les personnes qui occupent une place dans mon cœur

A HAMZAOUI Bouchra, ma chère amie avant d'être ma binôme, pour sa patience, son amour, et son soutien inconditionnel et sa compréhension tout au long de notre parcours ensemble.

Sommaire

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

CHAPITRE I Généralités sur l'échauffement des machines électriques

I.1	Introduction	3
I.2	La machine asynchrone.....	3
I.3	Construction de la machine asynchrone.....	3
I.3.1	Stator.....	4
I.3.2	Rotor.....	4
I.4	Principe de fonctionnement de la machine asynchrone.....	6
I.5	Les pertes dans les machines électriques	8
I.5.1	Les pertes dans le circuit électrique	8
I.5.2	Les Pertes dans le circuit magnétique	8
I.5.3	Pertes mécaniques	10
I.5.4	Pertes supplémentaire.....	11
I.6	Lois de transfert de chaleur dans une machine électrique.....	13
I.6.1	Échange de chaleur par conduction.....	13
I.6.2	Échange de chaleur par convection.....	15
I.6.3	Échange de chaleur par rayonnement.....	15
I.7	Conclusion.....	16

CHAPITRE II Refroidissement des moteurs électriques

II.1	Introduction	17
II.2	Méthodes de refroidissement.....	17
II.2.1	Refroidissement par air.....	17
II.2.1.1	Ventilation naturelle	17
II.2.1.2	Ventilation forcée	17
II.2.2	Refroidissement par liquide	18
II.2.2.1	Circuit de refroidissement par liquide à eau.....	18

II.2.2.2	Circuit de refroidissement par liquide à huile	18
II.2.3	Refroidissement par immersion	18
II.2.4	Refroidissement par évaporation.....	18
II.2.5	Refroidissement par gaz	19
II.3	Dimensionnement des ailettes	19
II.3.1	Modélisation des ailettes	20
II.3.2	Les données du problème	23
II.4	Résultats	25
II.5	Conclusion.....	26

CHAPITRE III Simulation magnétothermique d'un moteur asynchrone de 3kW

III.1	Introduction	27
III.2	principe de la méthode des éléments finis.....	27
III.3	Etude des phénomènes électromagnétiques	28
III.3.1	Equations de base	28
III.3.2	Formulation électrique A – V.....	29
III.4	Présentation de la machine étudiée	30
III.5	Présentation du logiciel Ansys-Motor-CAD	31
III.5.1	Géométrie de la machine	32
III.6	Calcul du bobinage	33
III.7	La Courbe de première aimantation.....	36
III.8	Courbe des pertes spécifiques de tôle M800-50A	36
III.9	Le maillage	37
III.10	Cartographie du champ magnétique	38
III.11	Caractéristiques électromécaniques	38
III.12	Caractéristiques magnétodynamiques.....	39
III.13	Induction dans l'entrefer	40
III.14	Les pertes dans la machines	41

III.15	Couplage magnétothermique et équations couplée	42
III.16	Simulation sans ailettes	44
III.17	Simulation avec ailettes	46
III.18	Conclusion.....	48
	Conclusion générale.....	49
	Bibliographique.....	50

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1. Symbole d'une machine asynchrone triphasé.....	3
Figure I.2. Eléments de constitution d'une machine à cage d'écureuil.....	4
Figure I.3. Stator d'une machine asynchrone	4
Figure I.4. Rotor bobiné.....	5
Figure I.5. Rotor à cage d'écureuil.....	6
Figure I.6. Création du champ tournant.....	7
Figure I.7. Représentation des champs magnétiques créés par les bobines	7
Figure I.8. Cycle d'hystérésis d'Un matériau magnétique	9
Figure I.9. Courant de Foucault dans le matériau magnétique.....	10
Figure I.10. Localisation des sources de pertes dans les roulements.....	11
Figure I.11. Différentes pertes dans un moteur asynchrone.....	13
Figure I.12. Conductivité thermique en fonction de la température	15
Figure I.13. Phénomène de convection thermique.....	15
Figure I.14. Le rayonnement thermique solaire.....	16

Chapitre II

Figure II.1. Distributeur de moteur électrique asynchrone à ventilation forcée à pattes B3	17
Figure II.2. Présente liquide utilisé de refroidissement du moteur électrique	18
Figure II.3. Ailette	19
Figure II.4. Utilisation d'ailettes pour augmenter le flux de chaleur évacué du mur.....	20
Figure II.5. Etude une ailette rectangulaire.....	20
Figure II.6. Etude des résistances	24

Chapitre III

Figure III.1. Eléments 2D triangulaires	27
Figure III.2. Éléments 2D carrés	27
Figure III.3. Moteur asynchrone à cage d'écureuil 3 kW.....	31
Figure III.4. Interface de logiciel	32
Figure III.5. Géométrie de la machine asynchrone à cage d'écureuil	33
Figure III.6. Distribution radiale de bobinage.....	35
Figure III.7. Distribution panoramique du bobinage.....	35
Figure III.8. Courbe de première aimantation de la tôle magnétiqueM800-50A.....	36

Figure III.9. Courbe des pertes spécifiques de tôle M800-50A	36
Figure III.10. Maillage de moteur	37
Figure III.11. L'induction magnétique	38
Figure III.12. Courant de ligne en fonction de la vitesse.....	38
Figure III.13. Couple du moteur en fonction de la vitesse	39
Figure III.14. Courbes des courants de phases en charge.....	39
Figure III.15. Courbe de variation de couple en fonction de temps	40
Figure III.16. Courbe de vitesse de rotation en fonction de temps	40
Figure III.17. Distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer	41
Figure III.18. Géométrie de la machine asynchrone à cage d'écureuil.....	43
Figure III.19. Vue radiale de la distribution de température du moteur par Ansys MotorCAD.	44
Figure III.20. Vue axiale de la distribution de température du moteur de test par Motor-CAD	44
Figure III.21. Variation de la température dans la carcasse du moteur sans les ailettes	45
Figure III.22. Variation de la température dans les têtes de bobines sans ailettes.....	45
Figure III.23. Vue radial de distribution des températures.....	46
Figure III.24. Vue axial de distribution de la température	46
Figure III.25. Variation de la température dans la carcasse du moteur.....	47
Figure III.26. Variation de la température dans les têtes de bobines.....	47

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II.1. Les données de la carcasse.....	23
Tableau II.2. Les données d'ailettes.....	23
Tableau II.3. Résultats de la carcasse	25
Tableau II.4. Résultats des ailettes	25

Chapitre III

Tableau III.1. Cahier de charges de la machine étudiée	30
Tableau III.2. Caractéristiques des bobines statoriques.	34
Tableau III.3. les pertes dans le stator	41
Tableau III.4. Les pertes dans le rotor	41

Liste des symboles

Liste des symboles

Φ : Densité de flux de chaleur $\left[\frac{W}{m^2} \right]$

λ : Conductivité thermique $\left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$

S : La surface $[m^2]$

P_{th} : Puissance thermique $[W]$

H : Le coefficient de convection ou d'échanges en $\left[\frac{W}{m^2 \times ^\circ C} \right]$

x : La distance $[m]$

T_∞ : Température à l'infinie $[C]$

T : Température de surface du solide $[^\circ C]$

T_a : La température ambiante du fluide loin (infini) de la surface d'échange. $[^\circ C]$

e : Épaisseur $[m]$

R_{th} : La résistance thermique $[\Omega]$

C : Capacité thermique massique $\left[\frac{J}{Kg \cdot K} \right]$

ρ : Masse volumique $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

ρc : Capacité thermique volumique $\left[\frac{J}{m^3 \cdot K} \right]$

P : Production volumique de chaleur $\left[\frac{W}{m^3} \right]$

T_a : est la température ambiante du fluide loin (infini) de la surface d'échange $[^\circ C]$.

P_j Pertes de joule $[W]$

R : Résistance du conducteur $[\Omega]$

I : Courant traversant le conducteur $[A]$

P_{hyst} : Pertes par hystérésis en $[W]$

f : La fréquence d'inversion de flux en $[Hz]$

K_h : Le coefficient d'hystérésis,

$\partial 1$ Et $\partial 2$: des constantes de perte d'hystérésis dépendant du matériau

P_{cf} : Pertes par courant de Foucault en [W]

K_f : Une constante qui dépend du matériau de la tôle

B_{max} : La densité de flux maximale dans le matériau [T]

$P_{m,r}$: Pertes mécanique dans les roulements [W]

ω : La vitesse angulaire de rotation $\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$

$k_{f,r}$: Le coefficient de frottement du roulement,

F_d : La charge dynamique du roulement

$d_{roulement}$: Le diamètre interne du roulement [m]

P_{sup} : Pertes supplémentaire [W]

P_{tot} : Pertes totales en charge [W]

P_f : Pertes fer [W]

P_{mec} : Pertes mécanique [W]

P_{js} : Pertes Joule statorique [W]

P_{jr} : Pertes Joule rotorique [W]

S_{ech} La surface d'échange [m²]

A : la section [m²]

P : est le périmètre de l'ailette [m]

ℓ : Hauteur d'ailette [m]

D : Diamètre extérieur de la carcasse [m]

L : Longueur de la carcasse [m]

S_0 : La surface de la carcasse [m²]

L_1 : Longueur d'ailette [m]

P_C : Le périmètre de la carcasse [m]

N : Nombre d'ailette

S_1 : Surface des ailettes [m²]

R_0 : Rayon intérieur de stator [m]

R_1 : Rayon extérieur de stator [m]

R_2 : Rayon intérieur de carcasse [m]

R_3 : Rayon extérieur de carcasse [m]

λ_1 : Conductivité thermique de fer _ silicium $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$

λ_2 : Conductivité thermique d'aluminium $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$

λ_3 : Conductivité thermique de cuivre $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$

Φ_{AE} : Flux entre les ailettes [W]

Φ_{AT} : Flux des ailettes [W]

Φ_{A1} : Flux d'une ailette [W]

P_A : Périmètre d'ailette [m]

\vec{E} : Champ électrique $\left[\frac{V}{m} \right]$

\vec{H} : Champ magnétique $\left[\frac{A}{m} \right]$

\vec{B} : Induction magnétique [T]

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide. $4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{H}{m} \right]$

μ_R : Perméabilité magnétique relative de milieu.

μ : Perméabilité magnétique absolue.

\vec{J}_s : Densité de courant dans les enroulements $\left[\frac{A}{m^2} \right]$

\vec{A} : Potentiel vecteur magnétique [T.m]

ρ : Résistivité. [$\Omega \cdot m$]

σ : Conductivité électrique [$\frac{S}{m}$]

ε_0 : Raccourcissement

P_N : Puissance nominale [W]

I_N : Courant nominale [A]

U_N : Tension nominale [V]

C_N : Couple nominale [N. m]

N_N : Vitesse de rotation [$\frac{tr}{min}$]

F : La fréquence [Hz]

m_1 : Nombre de phase

P : Nombre de paires de pôle

Z : Nombre d'encoche

q : Nombre d'encoches par pôle par phase

τ_1 : Le pas polaire [m]

K_{en} : Le facteur de bobinage statorique

K_i : Facteur d'inclinaison

K_d : Facteur de distribution

γ : Angle électrique entre deux phases

K_r : Le coefficient de raccourcissement

β : Rapport de raccourcissement

Y : Pas d'enroulement

Introduction générale

Introduction générale

La machine asynchrone est l'un des types les plus courants de moteurs électriques utilisés dans diverses applications industrielles et domestiques. Aussi connue sous le nom de moteur à induction, la machine asynchrone tire son nom du fait qu'elle ne nécessite pas de synchronisation exacte entre le champ magnétique tournant et le rotor pour fonctionner. Ce type de machine est largement utilisé en raison de ses avantages tels que sa simplicité de construction, sa fiabilité et son coût relativement faible.

Lors du fonctionnement de la machine asynchrone, un phénomène thermique se produit en raison des pertes d'énergie dans le système. Ces pertes peuvent être classées en plusieurs catégories, telles que les pertes par effet Joule dans les enroulements, les pertes magnétiques et les pertes mécaniques dues aux frottements. Ces pertes se traduisent par une augmentation de la température de la machine.

La gestion du phénomène thermique est essentielle pour assurer un fonctionnement fiable et optimal de la machine asynchrone. Un refroidissement adéquat est nécessaire pour maintenir la température de la machine dans des limites acceptables. Différentes méthodes de refroidissement, telles que le refroidissement par air, par eau ou par ventilation forcée, peuvent être utilisées en fonction des exigences de l'application.

En outre, la carcasse du moteur joue un rôle crucial dans le refroidissement de ce dernier, car elle est conçue pour dissiper la chaleur générée pendant le fonctionnement. Les ailettes présentes sur la carcasse augmentent la surface d'échange thermique, permettant ainsi à l'air ambiant de circuler plus efficacement et de refroidir le moteur. Grâce à ce système de refroidissement efficace, les moteurs asynchrones peuvent fonctionner de manière optimale, évitant ainsi les surchauffes et les pannes prématurées.

L'objectif de ce travail est le calcul de la carcasse d'un moteur asynchrone à cage fabriqué par l'entreprise nationale Electro-Industries. Dans un premier temps, une approche analytique sera employée pour effectuer ce calcul. Ensuite, les résultats obtenus seront utilisés pour réaliser une simulation numérique par la méthode des éléments finis du moteur, permettant ainsi de déterminer les températures dans les différentes parties de celui-ci.

Notre mémoire est scindé en trois chapitres :

Le premier chapitre de ce document aborde les notions générales concernant le phénomène thermique dans les machines électriques, en mettant l'accent sur les différents modes de transfert de chaleur. Une attention particulière est accordée au moteur asynchrone qui fait l'objet de notre étude.

Le deuxième chapitre de ce mémoire se concentre sur les différentes méthodes de refroidissement des moteurs asynchrones. Plusieurs systèmes de refroidissement y sont présentés, mettant en évidence les approches les plus couramment utilisées. Enfin, ce chapitre aborde le calcul de la carcasse d'un moteur asynchrone de 3 kW.

Le troisième et dernier chapitre de ce mémoire est divisé en deux parties. La première partie présente les résultats de la simulation électromagnétique réalisée sur le moteur en question. La deuxième partie du chapitre exploite ces résultats, ainsi que les données obtenues à partir du calcul de la carcasse, pour effectuer une simulation thermique approfondie. Cette simulation permet de déterminer la distribution de la température dans les différentes zones du moteur.

Nous terminons par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Généralités sur l'échauffement des machines électriques

I.1 Introduction

Dans le domaine de la conception des machines électriques, l'étude du phénomène thermique est aussi cruciale que l'étude électromagnétique de la machine. En effet, l'élévation de température d'une machine détermine la puissance de sortie qu'elle peut fournir lorsqu'elle fonctionne à pleine charge. Comprendre et maîtriser la dissipation thermique dans les moteurs électriques est essentiel pour garantir des performances optimales et éviter toute dégradation due à une surchauffe [1].

Dans ce chapitre, nous abordons les notions générales concernant le phénomène d'échauffement dans les machines électriques, en accordant une attention particulière au moteur asynchrone.

I.2 La machine asynchrone

La machine asynchrone est une machine à courant alternatif dont la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique tournant ne sont pas identiques en raison du glissement. Le rotor est toujours en retard par rapport au champ statorique. On dit alors que la machine asynchrone est une « machine à induction », puisque l'énergie est transférée du stator au rotor ou inversement par induction électromagnétique [2].

La machine asynchrone peut être représentée par son symbole normalisé général. Celui-ci précise si elle fonctionne en moteur ou en générateur. Le symbole peut apporter des indications sur la nature de la machine [3].

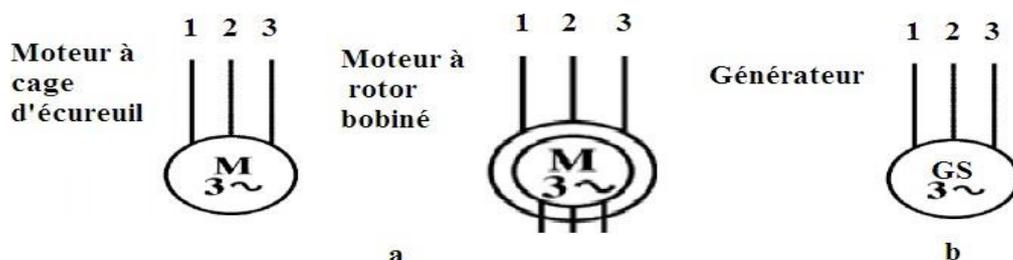


Figure I.1. Symbole d'une machine asynchrone triphasé

I.3 Construction de la machine asynchrone

Souvent appelée moteur à induction, la machine asynchrone, comporte un stator et un rotor. Elle est constituée de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe, on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation, suivant les enroulements du rotor, ces derniers sont accessibles de l'extérieur ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence. On définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil [4]. Pourtant, nous admettrons que sa structure est,

électriquement, équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit. Dans ce travail, nous nous intéressons à la machine asynchrone à cage d'écureuil.

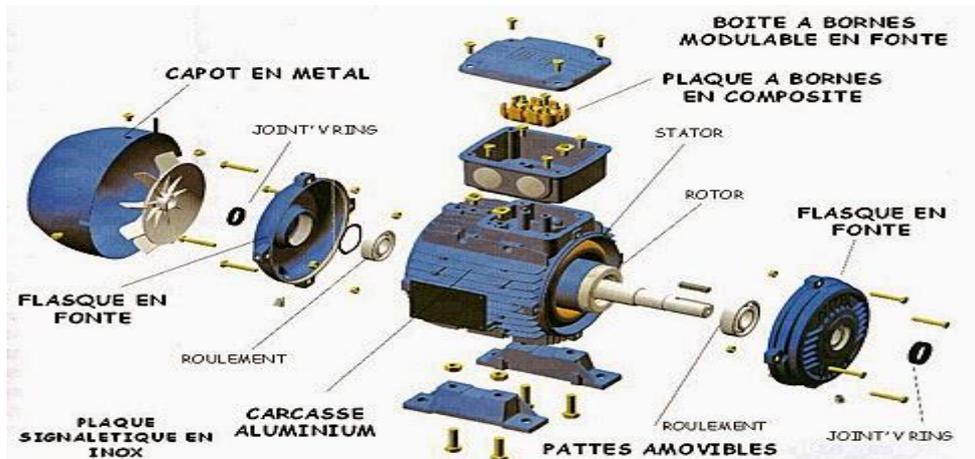


Figure I.2. Eléments de constitution d'une machine à cage d'écureuil

I.3.1 Stator

Celui-ci est composé d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine. On peut décomposer le bobinage starotique en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines.

Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique responsable de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation pertinente des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. Le but est d'avoir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, de façon à limiter les ondulations du couple électromagnétique [5].

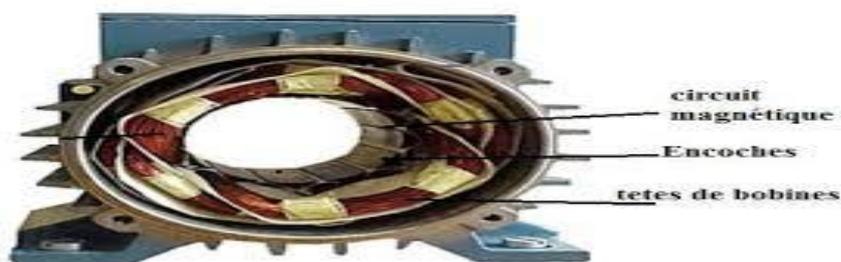


Figure I.3. Stator d'une machine asynchrone

I.3.2 Rotor

Le rotor n'est relié à aucune alimentation. Celui-ci se compose d'un cylindre de tôles poinçonnées à leur périphérie extérieure pour former les encoches destinées à recevoir des conducteurs. Il est séparé du stator par un entrefer. Il existe deux types de rotor :

I.3.2.1 Rotor bobiné

Le rotor bobiné comprend un bobinage triphasé, comparable à celui du stator, placé dans les encoches. Ce dernier est composé de trois enroulements raccordés en étoile ; l'extrémité libre de chaque enroulement est jointe à une bague tournante avec l'arbre. Ces bagues permettent, par le biais de trois balais, d'insérer une résistance extérieure en série avec chacun des trois enroulements lors de démarrages du moteur. En fonctionnement normal, les trois balais sont court-circuités [6].

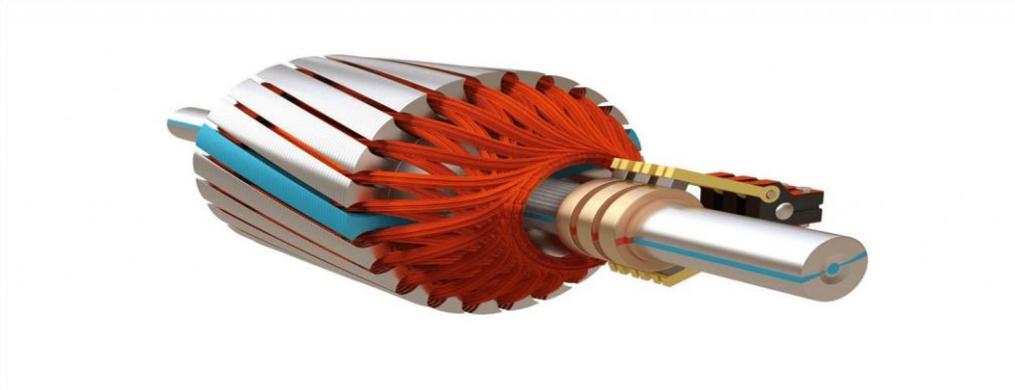


Figure I.4. Rotor bobiné

I.3.2.2 Rotor à cage d'écureuil

Ce type de rotor a été inventé au début des années 1890. Ces rotors sont faits à partir de tôles ferromagnétiques et de barres conductrices régulièrement réparties à la périphérie du rotor. Les barres sont reliées entre elles par des anneaux de court-circuit. Les tôles ferromagnétiques servent à guider les lignes de champ alors que les barres accueillent les courants d'induits. Concernant les machines de faible puissance, les rotors sont réalisés à partir d'un empilement de tôles découpées et isolées les unes des autres (feuilletage) dans lesquelles on insuffle un matériau conducteur de façon à constituer les barres ainsi que les anneaux de court-circuit. Au sujet des machines de forte puissance, les barres sont insérées dans le rotor puis les anneaux de court-circuit sont soudés ou brasés aux barres. En général, le matériau constituant les barres et les anneaux de court-circuit est un alliage à base d'aluminium. En effet, on peut également retrouver du cuivre ou du laiton. Habituellement, les barres sont inclinées de manière légère suivant l'axe du rotor, pour que la qualité des barres présentes sous une phase statorique soit constante, et cela, peu importe la position du rotor. Ce moyen permet de faire baisser la variation de la réluctance du circuit magnétique au cours de la relation du rotor (ou « effet d'encoches ») et de donc de diminuer les oscillations de couple. De ce fait, cette inclinaison des encoches donne à l'ensemble barres plus anneaux de court-circuit la forme d'une cage d'écureuil

déformée. Les moteurs à cage d'écureuil sont les plus utilisés : ils représentent de 80 à 85 % en milieu industriel [7].

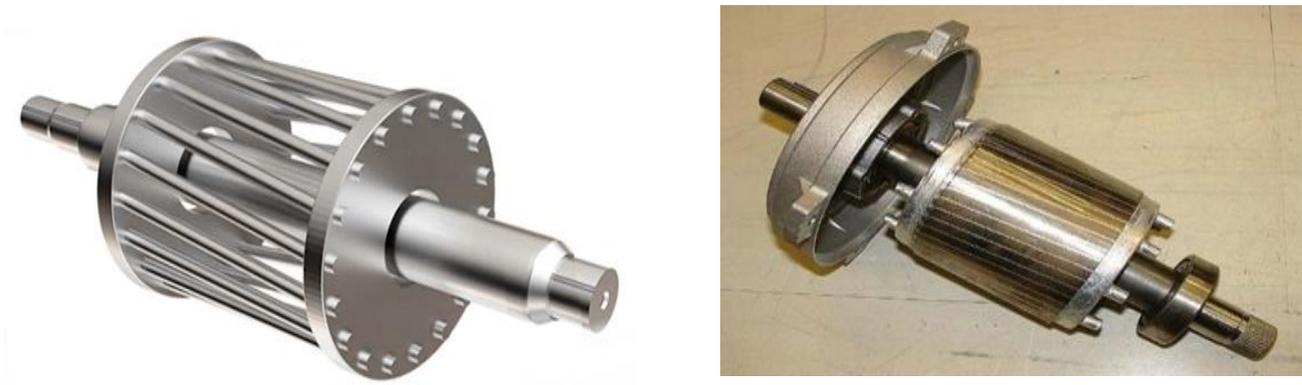


Figure I.5. Rotor à cage d'écureuil

I.4 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

Les enroulements du stator sont reliés au réseau électrique. Suivant la constitution de la machine, il peut s'agir, d'un réseau monophasé ou polyphasé (généralement triphasé). Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans le stator. Ce champ tourne à la même fréquence que les courants statoriques, à savoir à la fréquence f de l'alimentation électrique. La vitesse du champ tournant est alors nommée vitesse de synchronisme, notée N_s (tr/min).

$$N_s = \frac{60f}{p} \quad [\text{tr/min}] \quad (\text{I.1})$$

P : est le nombre de paires de pôles de la machine.

L'enroulement au rotor est alors soumis à des fluctuations du champ magnétique. Une force électromotrice induite jaillit et permet, par sa variation, le développement de courants de Foucault dans les conducteurs rotoriques qui sont en court-circuit. Ces courants rotoriques créent une force de Laplace qui tend à s'opposer à la cause qui lui a donné naissance (Loi de Lenz). De ce fait, le rotor se met donc à tourner pour s'opposer à la variation du champ magnétique et tente donc de le suivre.

De par sa nature même, le champ magnétique rotoriques ne peut exister que si la vitesse de rotation du rotor est plus faible que la vitesse du champ tournant. En effet, si les champs statoriques et rotoriques avaient la même vitesse, les courants induits au rotor s'annuleraient, de même que le couple qu'ils produisent et la machine ne serait plus entraînée.

On dit alors que le rotor « glisse » par rapport au stator. Cette différence de vitesse est appelée glissement (noté g) et est exprimée sous forme de pourcentage de la vitesse de synchronisme.

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \tag{I.2}$$

Avec N la vitesse de rotation de la machine. [8]

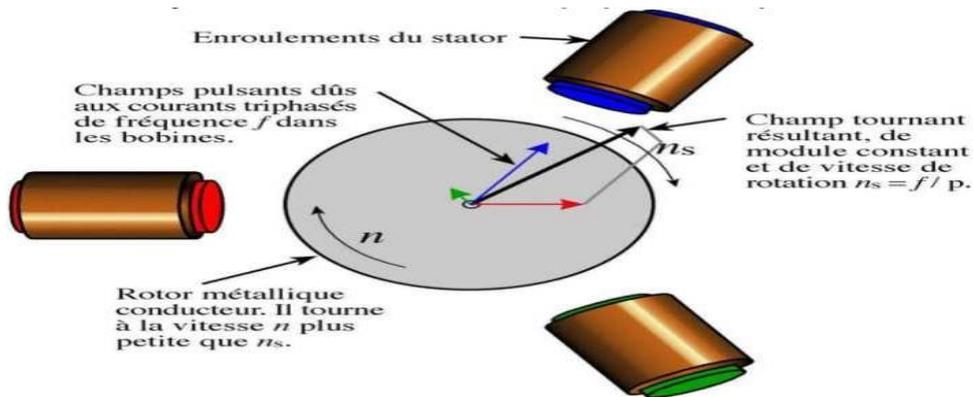


Figure I.6. Création du champ tournant

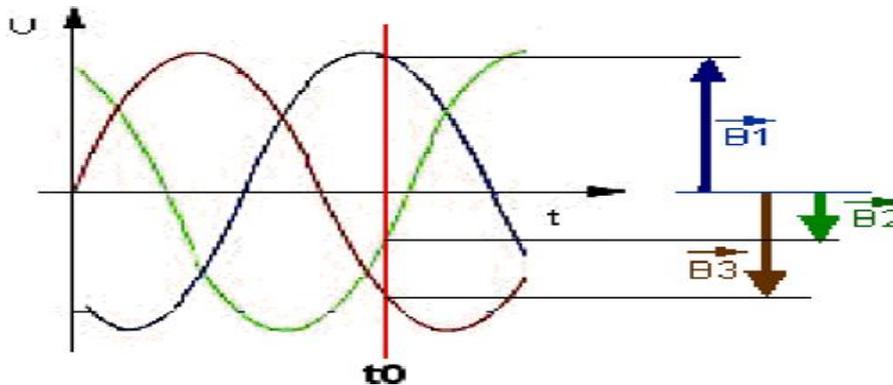


Figure I.7. Représentation des champs magnétiques créés par les bobines

Les trois enroulements statoriques créent donc un champ magnétique tournant, sa fréquence de rotation est appelée fréquence de synchronisme [9].

Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique tournant à la pulsation :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} \tag{I.3}$$

Avec :

Ω_s : Vitesse de rotation du champ tournant.

ω : Pulsation des courants alternatifs.

P : Pulsation des courants alternatifs.

I.5 Les pertes dans les machines électriques

Les machines électriques sont des dispositifs qui permettent la transformation d'énergie, que ce soit de l'énergie électrique vers de l'énergie mécanique ou vice versa. Cependant, lors de ces transformations, des pertes d'énergie se produisent, et il est crucial de les prendre en compte [10].

Ces pertes peuvent être regroupées en quatre grandes catégories :

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

I.5.1 Les pertes dans le circuit électrique

Les pertes joule sont un aspect important à prendre en compte dans les machines électriques. Elles résultent de la résistance électrique des composants, tels que les conducteurs et les bobines, à travers lesquels circule le courant électrique. Lorsque le courant passe à travers ces éléments, une certaine quantité d'énergie est dissipée sous forme de chaleur en raison de l'effet Joule [11].

$$P_j = RI^2 \quad (\text{I.4})$$

Avec :

R : Résistance du conducteur [Ω]

I : Courant traversant le conducteur [A]

Dans les moteurs asynchrones ces pertes sont localisées dans les enroulements statoriques, et dans la cage d'écureuil du rotor [12].

I.5.2 Les Pertes dans le circuit magnétique

Elles sont appelées aussi pertes dans le fer du fait que les matériaux utilisés par ce circuit sont, habituellement, à base de fer. Les pertes fer sont le résultat de deux phénomènes physique les pertes par hystérésis et les pertes par courant de Foucault [10].

I.5.2.1 Pertes par hystérésis

Les pertes par hystérésis sont produites en raison de la friction associée au mouvement de la paroi du domaine magnétique et de la rotation des moments magnétiques lorsqu'un champ magnétique externe est appliqué. Pour un champ magnétique alternatif, une boucle est formée dans le plan $B - H$, formant la courbe d'hystérésis. La zone entourée par une telle boucle correspond aux pertes par hystérésis.

La Figure (I.8) présente le cycle d'hystérésis d'un matériau magnétique.

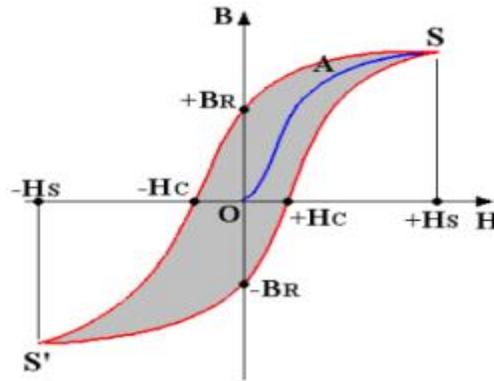


Figure I.8. Cycle d'hystérésis d'Un matériau magnétique

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

$$P_{\text{hyst}} = \int_V^t \left(\frac{1}{t} \int H dB \right) dV \quad (\text{I.5})$$

Habituellement, le fabricant spécifie des courbes de pertes fer en fonction de la perte par unité de volume ou de masse, en fonction de la densité de flux et de la fréquence. Dans certains cas, des expressions empiriques sont données à la place des courbes.

La formule de Steinmetz montre l'équation analytique du calcul des pertes d'hystérésis :

$$P_{\text{hyst}} = K_h \cdot F^{\partial 1} \cdot B_m^{\partial 2} \quad (\text{I.6})$$

Avec :

F : La fréquence d'inversion de flux en [Hz]

K_h : est le coefficient d'hystérésis,

$\partial 1$ Et $\partial 2$: des constantes de perte d'hystérésis dépendant du matériau

B_m : est la densité de flux de pointe AC.

Selon, la boucle d'hystérésis est parcourue une fois par période, ce qui implique que $\partial 1 = 1$. De plus, si la boucle d'hystérésis est approximée comme étant rectangulaire, on peut supposer que $\partial 1 = 2$ [13].

$$P_{\text{hyst}} = K_h \cdot F \cdot B_m^2 \quad (\text{I.7})$$

I.5.2.2 Pertes par courant de Foucault

Le champ magnétique alternatif induit dans le noyau par des forces électromagnétiques crée un courant induit dans le matériau. Ces courants induits vont créer des pertes joules (car

les matériaux magnétiques ont une résistivité non nulle). Ces pertes sont dissipées sous forme de chaleur) [11].

On peut estimer les pertes par courant de Foucault avec la relation empirique suivante :

$$p_{cf} = k_f \cdot (e \cdot F \cdot B_{\max})^2 \quad (I.8)$$

Dans cette formule :

K_f : est une constante qui dépend du matériau de la tôle

F : est la fréquence [Hz]

e : L'épaisseur de la tôle [mm]

B_{\max} : La densité de flux maximale dans le matériau [T] [10].

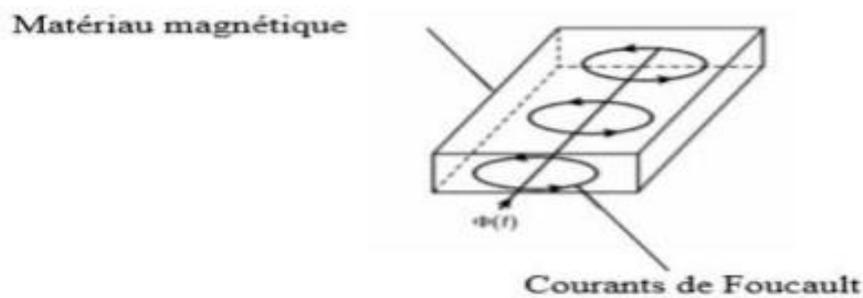


Figure I.9. Courant de Foucault dans le matériau magnétique

I.5.3 Pertes mécaniques

Ce sont les pertes qui sont issues des frottements dus à la giration des parties tournantes de la machine. Frottement entre solides et frottement entre solides et fluides. Elles pressent respectivement aux dispersions dans les roulements et aux dispersions visqueuses dans la machine [11].

I.5.3.1 Pertes dans les roulements

Les roulements constituent le siège des pertes de puissance sous forme de chaleur par la présence des frottements dans ses différentes zones. Ces pertes peuvent provenir de plusieurs origines :

- Frottements entre les corps roulants et les bagues (points 1,2 et 5 de la figure),
- Frottements entre les corps roulants et la cage (points 4 et 6 de la figure),
- Frottements entre la cage et les bagues,
- Frottement visqueux dû au mouvement du lubrifiant,
- Frottement du joint d'étanchéité [14].

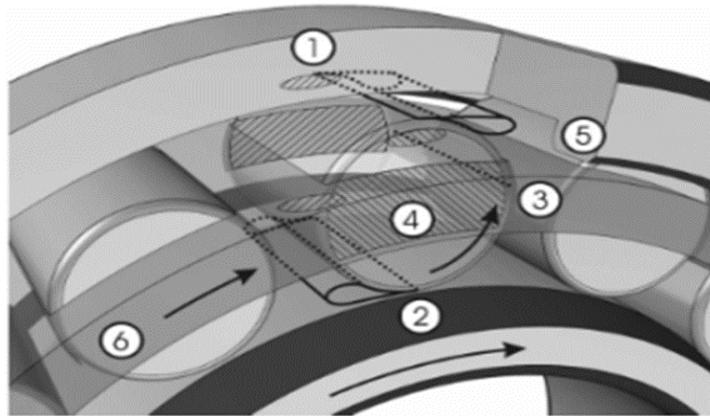


Figure I.10. Localisation des sources de pertes dans les roulements

Et peuvent être estimées par la formule :

$$P_{m,r} = 0.5 k_{f,r} \omega \cdot F_d \cdot d_{roulement} \quad (I.9)$$

Où :

$k_{f,r}$: est le coefficient de frottement du roulement

F_d : est la charge dynamique du roulement

ω : la vitesse angulaire de rotation

$d_{roulement}$: Le diamètre interne du roulement [11].

I.5.3.2 Les pertes par ventilation

Les pertes de ventilation sont la puissance fournie par le ventilateur monté dans l'extrémité de l'arbre de la machine. Utilisée pour le refroidissement de la machine [12].

En pratique-t-on ne peut pas séparer les pertes mécaniques (par frottement, par ventilation) dans une machine puisqu'elle est due à la rotation, mais on peut le faire à basse vitesse, car dans ce cas les pertes par ventilation sont négligeables, donc on estime juste les pertes par frottement. [10].

I.5.4 Pertes supplémentaire

Ce sont des pertes dues à tous les phénomènes secondaires :

➤ Conducteurs :

- Par effet de peau
- Flux de fuites d'encoches et des têtes de bobines
- Harmoniques d'espace dues aux discontinuités géométriques
- Inclinaison d'encoches et le contact entre les barres et la tôle (courant inter barres).

➤ **Tôle**

- Par effet pelliculaire aux fréquences élevées (harmoniques de dentures)
- Par effet d'extrémités dues aux flux de fuites des têtes de bobines
- Par discontinuités géométriques (présences des encoches) (pulsation de flux et différentiel d'encoche (zigzag))
- Harmonique de temps si l'alimentation n'est pas sinusoïdale

L'estimation et la détermination expérimentale des pertes supplémentaires en charge est l'un des problèmes les plus aigus dans la caractérisation des pertes du moteur asynchrone. Elles peuvent être définies comme la différence entre les pertes totales en charge de la machine et les pertes déterminées par la méthode de séparation des pertes [12].

$$P_{\text{sup}} = P_{\text{tot}} - (P_f + P_{\text{mec}} + P_{\text{js}} + P_{\text{jr}}) \quad (\text{I.10})$$

Avec :

P_{sup} : Pertes supplémentaire [W]

P_{tot} : Pertes totales en charge [W]

P_f : Pertes fer [W]

P_{mec} : Pertes mécanique [W]

P_{js} : Pertes Joule statorique [W]

P_{jr} : Pertes Joule rotorique [W].

La figure ci-dessous illustre les différentes pertes dans un moteur asynchrone à cage.

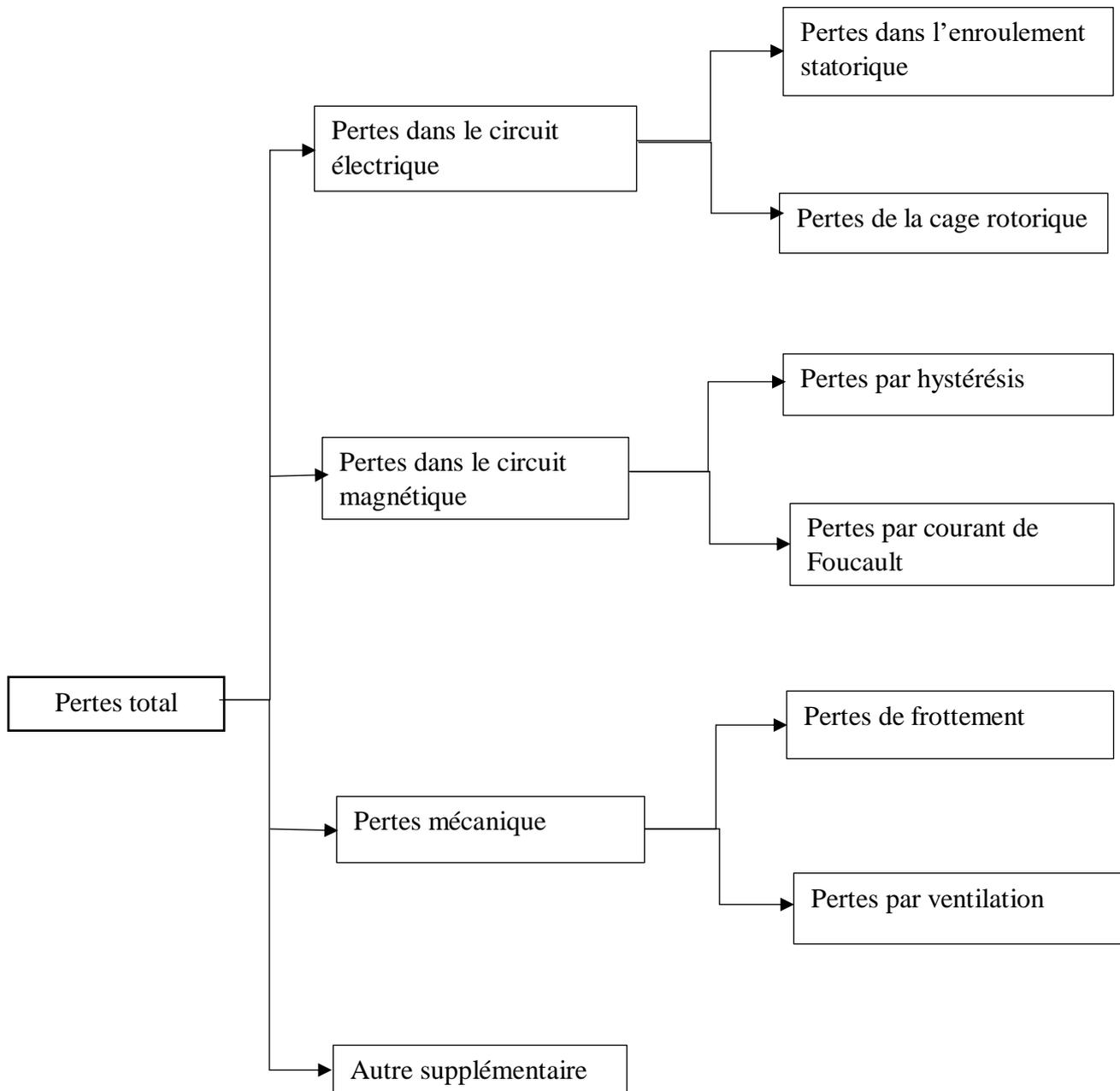


Figure I.11. Différentes pertes dans un moteur asynchrone

I.6 Lois de transfert de chaleur dans une machine électrique

I.6.1 Échange de chaleur par conduction

La conduction thermique est un transfert de chaleur à travers un milieu matériel sans déplacement de la matière. La chaleur se propage suivant des lignes de flux normaux des surfaces isothermes. La conduction est un transfert spontané d'une région de température élevée

vers une région de température plus basse, et obéit à la loi établie mathématiquement par Jean-Baptiste Biot en 1804 puis expérimentalement par Fourier en 1822. Selon cette loi la densité de flux de chaleur est proportionnelle :

- À l'opposé du gradient de la température
- À la conductivité thermique, dépendant de la température, dont l'ordre de grandeur varie suivant la nature du corps.

Le mécanisme de transfert local de chaleur est décrit par la relation de Fourier au sein d'un corps homogène et isotrope.

$$\vec{q} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (\text{I.11})$$

Le signe moins (-) signifie ainsi que le flux de chaleur tend à équilibrer les échanges thermiques et donc à égaliser les températures. Par convention, le flux est compté positivement dans le sens d'écoulement de la chaleur [15]

I.6.1.1 Équation de conduction de la chaleur

L'étude du comportement thermique des dispositifs électromagnétiques passe absolument par la résolution de l'équation de conduction qui s'écrit sous la forme suivante pour un matériau linéaire et isotrope sous la forme suivante [16]

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = q + \text{div}(\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T) \quad (\text{I.12})$$

Avec :

C : Capacités thermique massique $\left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$.

ρ : Masse volumique $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$.

λ : Conductivité thermique $\left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$.

ρc : Capacité thermique volumique $\left[\frac{\text{J}}{\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}} \right]$.

q : Production volumique de chaleur $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^3} \right]$.

I.6.1.2 Conductivité des matériaux

Dans les parties de la machine constituées de matériaux homogènes (carcasse, barres du rotor, entrefer, arbre) les valeurs de la conductivité se trouvent dans les bases de données des matériaux concernés. En revanche, pour le bobinage composé d'au moins deux matériaux différents, il est important de se servir des techniques d'homogénéisation appropriées afin de trouver les caractéristiques d'un matériau homogène [16].

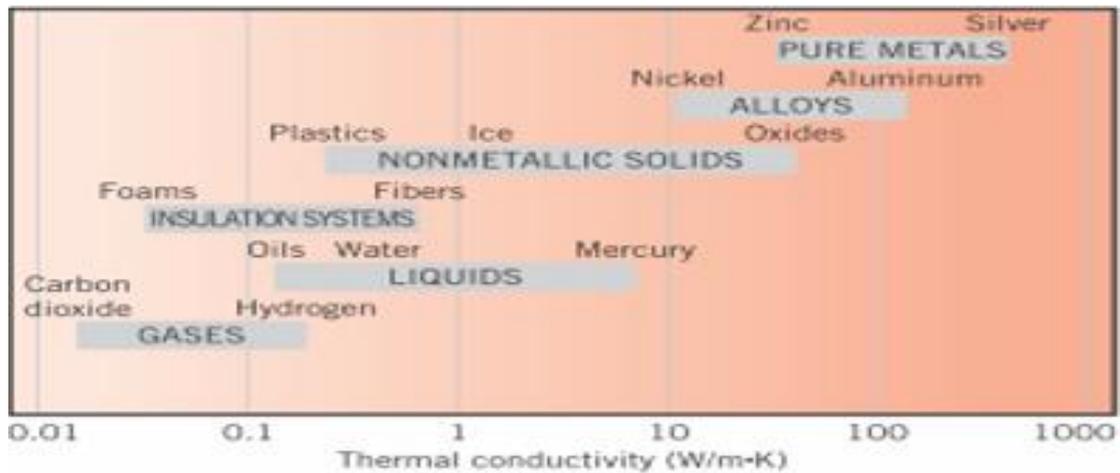


Figure I.12. Conductivité thermique en fonction de la température

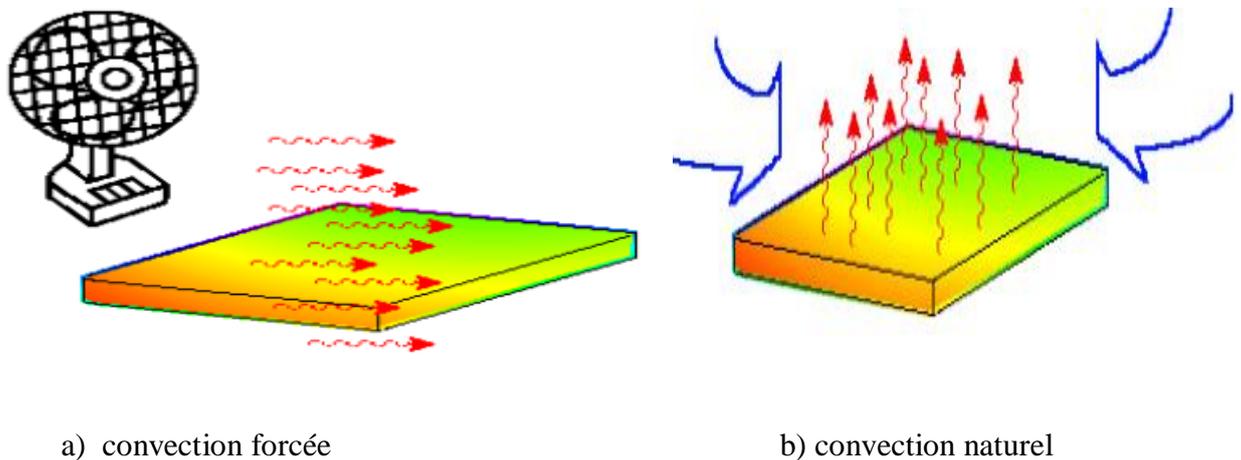
I.6.2 Échange de chaleur par convection

Il s'agit d'un transport de chaleur dû au mouvement d'un fluide de température moyenne θ_m en contact d'un solide de température θ_s .

La loi de Newton permet de relier la densité du flux de chaleur $\phi \left[\frac{W}{m^2} \right]$ à la différence de température entre les deux milieux par la relation [16] :

$$\phi = h (\theta_s - \theta_m) \tag{I.13}$$

h : Est le coefficient de convection ou d'échanges en $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$



a) convection forcée

b) convection naturel

Figure I.13. Phénomène de convection thermique.

I.6.3 Échange de chaleur par rayonnement

Le transfert de chaleur par rayonnement constitue une forme particulière de transfert thermique dans laquelle le porteur d'énergie n'est plus constitué par des particules, mais par des ondes électromagnétiques ayant à l'origine l'agitation atomique à la surface d'un corps.

Dans les machines électriques, en raison de l'étroite plage de températures (inférieure à 100°C), le transfert de chaleur par rayonnement n'est souvent pas un mode de transfert aussi important que le transfert de chaleur par convection ou par conduction.

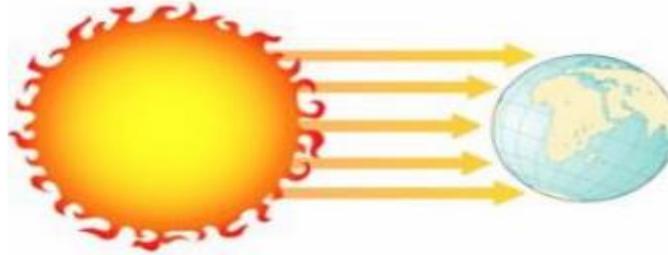


Figure I.14. Le rayonnement thermique solaire

Conformément à la loi de Stefan-Boltzmann, le flux de chaleur échangé par rayonnement entre deux corps de température T_s et T_∞ s'écrit sous la forme

$$q = \varepsilon \sigma \cdot S \cdot (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (\text{I.14})$$

Avec :

σ : La constante de Stefan-Boltzmann, égale à $5.67032 \times 10^{-8} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \right]$

Le facteur d'émissivité dépend du type de l'état de la surface et le matériau utilisé, ainsi que sa direction de rayonnement. Sa valeur peut être déduite des tableaux présents dans la littérature ou via l'expérimentation [15].

I.7 Conclusion

Les échauffements des machines électriques sont un problème sérieux qui peut avoir un impact négatif sur leur efficacité, leur fiabilité et leur durée de vie. Dans ce chapitre, nous avons présenté le moteur asynchrone, sa constitution, son principe de fonctionnement ainsi que les différentes causes d'échauffement de ce type de moteurs. Nous avons aussi donné un aperçu sur les modes de transfert de chaleur. Dans ce qui suit nous abordons les systèmes de refroidissement des moteurs asynchrones.

CHAPITRE II

Refroidissement

des moteurs électriques

II.1 Introduction

Le refroidissement du moteur électrique est indispensable pour éviter la surchauffe et maintenir ce dernier dans des conditions de fonctionnement optimales. Que ce soit par refroidissement par liquide ou par air, un système de refroidissement bien entretenu contribue à la longévité et aux performances du moteur.

Dans ce chapitre, nous abordons les différentes techniques de refroidissement utilisées dans les moteurs asynchrones, ainsi que le calcul analytique des carcasses.

II.2 Méthodes de refroidissement

II.2.1 Refroidissement par air

Le refroidissement par air est une méthode de dissipation de la chaleur qui utilise l'air ambiant pour réduire la température d'un système ou d'un composant. L'air est utilisé pour transférer la chaleur générée vers l'environnement, souvent en utilisant des dispositifs tels que des dissipateurs thermiques et des ventilateurs [17] [18].

II.2.1.1 Ventilation naturelle

Le refroidissement par air avec ventilation naturelle fait référence à l'utilisation de flux d'air naturels, tels que les courants d'air causés par les différences de température et les effets du vent, pour dissiper la chaleur d'un système ou d'un espace. Il exploite les principes de la convection naturelle pour permettre à l'air frais de circuler et à l'air chaud de s'échapper, contribuant ainsi au refroidissement [19] [20].

II.2.1.2 Ventilation forcée

Le refroidissement par air avec ventilation forcée implique l'utilisation de ventilateurs ou de systèmes de ventilation mécaniques pour générer un flux d'air artificiel et accélérer le transfert de chaleur d'un système ou d'un espace vers l'environnement. Il est couramment utilisé dans les systèmes de climatisation et de refroidissement industriels pour augmenter le taux de dissipation de chaleur [21] [22].



Figure II.1. Distributeur de moteur électrique asynchrone à ventilation forcée à pattes B3

II.2.2 Refroidissement par liquide

Le refroidissement par liquide implique l'utilisation d'un fluide, tel que de l'eau ou un autre liquide de refroidissement, pour extraire la chaleur d'un système ou d'un composant. Le liquide absorbe la chaleur et est ensuite refroidi ou rejeté dans l'environnement, permettant ainsi de maintenir une température optimale [23] [24].



Figure II.2. Présente liquide utilisé de refroidissement du moteur électrique

II.2.2.1 Circuit de refroidissement par liquide à eau

Le circuit de refroidissement par liquide à eau est un système qui utilise de l'eau comme fluide de refroidissement pour dissiper la chaleur d'un système ou d'un composant. L'eau circule à travers des canalisations, des échangeurs de chaleur et des radiateurs pour absorber la chaleur générée et la rejeter dans l'environnement [23] [24].

II.2.2.2 Circuit de refroidissement par liquide à huile

Le circuit de refroidissement par liquide à huile utilise de l'huile comme fluide de refroidissement pour évacuer la chaleur d'un système ou d'un composant. L'huile circule à travers des canalisations, des échangeurs de chaleur et des radiateurs pour absorber la chaleur générée et la dissiper dans l'environnement [24] [25].

II.2.3 Refroidissement par immersion

Le refroidissement par immersion est une méthode qui implique l'immersion d'un composant ou d'un système dans un fluide de refroidissement, tel que de l'eau ou de l'huile. Le fluide entoure le composant, permettant ainsi un transfert de chaleur plus efficace par conduction et convection, ce qui contribue à réduire la température [26] [27].

II.2.4 Refroidissement par évaporation

Le refroidissement par évaporation est un processus qui utilise l'évaporation d'un liquide, généralement de l'eau, pour absorber la chaleur et réduire la température d'un système. Lorsque le liquide s'évapore, il absorbe la chaleur de son environnement, ce qui entraîne un refroidissement efficace [21] [28].

II.2.5 Refroidissement par gaz

Le refroidissement par gaz utilise un gaz, tel que l'air ou un gaz réfrigérant, pour extraire la chaleur d'un système. Le gaz circule à travers des canalisations, des échangeurs de chaleur et d'autres dispositifs pour absorber la chaleur et la rejeter dans l'environnement, permettant ainsi de maintenir une température basse [21] [24].

II.3 Dimensionnement des ailettes

L'ailette est le corps chaud, la chaleur se propage par conduction à travers l'ailette qui est refroidi par convection par le fluide environnant

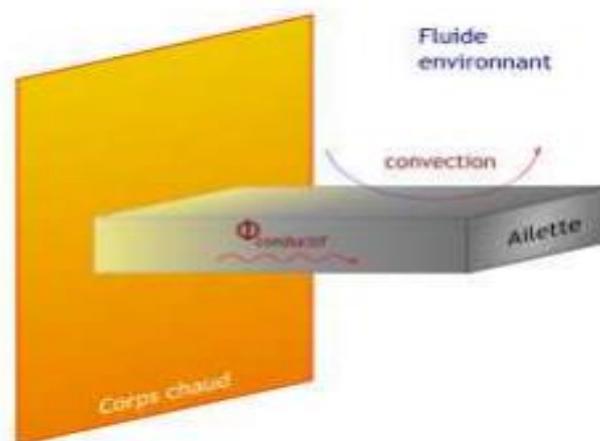


Figure II.3. Ailette

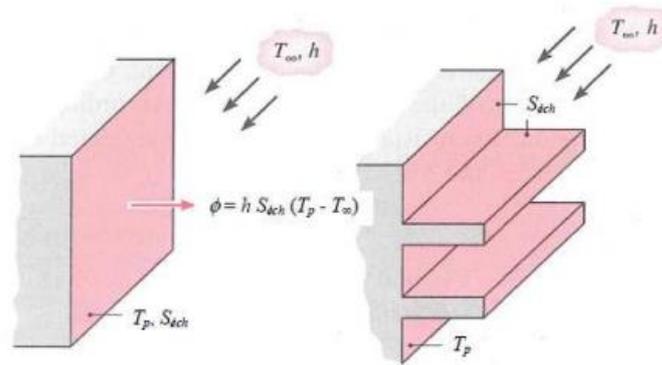
Considérons le mur plan de la figure (a). Le flux de chaleur évacué du mur par convection s'exprime par la loi de Newton

$$\Phi = h.S(T - T_{\infty}) \quad (\text{II.1})$$

Si T est fixée, il y a deux possibilités pour augmenter le flux de chaleur évacué :

- ❖ Augmenter le coefficient h en augmentant la vitesse de l'écoulement et/ou diminuer T_{∞}
- ❖ Augmenter h coût trop élevé (installation de pompes ou de ventilateurs puissants et encombrants).
- ❖ Réduire T_{∞} souvent infaisable dans une installation.
- ❖ Augmenter la surface d'échange S en utilisant des ailettes figure (b).

La conductivité thermique du matériau de l'ailette doit être élevée pour minimiser les gradients de température entre la base et l'extrémité de l'ailette [29].



(a) mur plan

b) mur muni d'ailettes.

Figure II.4. Utilisation d'ailettes pour augmenter le flux de chaleur évacué du mur

II.3.1 Modélisation des ailettes

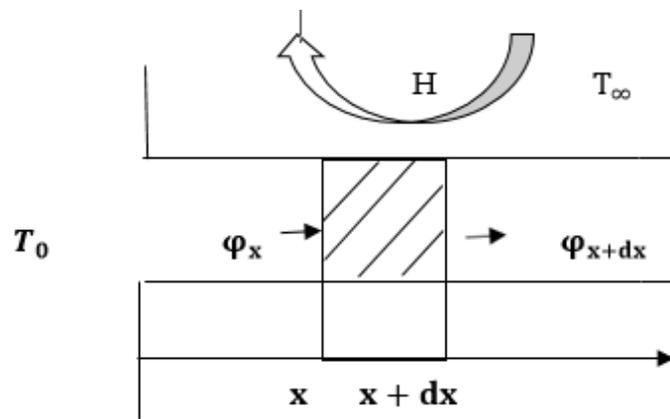


Figure II.5. Etude une ailette rectangulaire

En effectuant un bilan thermique sur le tronçon d'ailette de largeur Δx :

Flux qui entre à x = flux qui sort à $x + dx$ + flux qui sort par convection
 Par conduction Par conduction par la surface latérale

Le bilan s'écrit :

$$\varphi_x = \varphi_{x+dx} + \varphi_{conv} \tag{II.2}$$

$$\varphi_x = -\left(\lambda * A \frac{dt}{dx}\right)_x \tag{II.3}$$

$$\varphi_{x+dx} = -\left(\lambda * A \frac{dt}{dx}\right)_{x+dx} \tag{II.4}$$

$$\varphi_{conv} = h * p * dx [T(x) - T_{\infty}] \tag{II.5}$$

Avec :

A : L'air de la section de passage du flux de conduction

P : Est le périmètre de l'ailette (périmètre d'échange du flux convectif)

- Barre de section carrée $A_x = A_{x+dx}$ (II.6)

- Périmètre $p = 4a$ (II.7)

- Section carrée $A_x = a^2$ (II.8)

- Surface d'échange latérale $p * d * x$ (II.9)

Soit :
$$-\left(\lambda * A \frac{dT}{dx}\right)_x = -\left(\lambda * A \frac{dT}{dx}\right)_{x+dx} + hpdx[T(x) - T_\infty]$$
 (II.10)

λ Et A sont indépendants de l'abscisse x, donc nous avons :

$$\lambda * A \left[\left(\frac{dT}{dx}\right)_{x+dx} - \left(\frac{dT}{dx}\right)_x \right] = h * p * dx [T(x) - T_\infty]$$
 (II.11)

Nous avons :

$$\left(\frac{dT}{dx}\right)_{x+dx} = \left(\frac{dT}{dx}\right)_x + \frac{d}{dx} \left(\frac{dT}{dx}\right)_x dx + \frac{d^2}{dx^2} \left(\frac{dT}{dx}\right)_x \frac{dx^2}{2} + \dots$$
 (II.12)

Si on retient seulement le premier facteur du développement en série de Taylor de $\left(\frac{dT}{dx}\right)_{x+dx}$

On obtient :

$$\left(\frac{dT}{dx}\right)_{x+dx} = \left(\frac{dT}{dx}\right)_x + \frac{d}{dx} \left(\frac{dT}{dx}\right)_x dx = \frac{dT}{dx} + \left(\frac{d^2T}{dx^2}\right)_x dx$$
 (II.13)

On obtient l'équation :

$$\lambda * A \left[\left(\frac{d^2T}{dx^2}\right)_x dx \right] = h * p * dx [T(x) - T_\infty] \rightarrow \lambda * A \frac{d^2T}{dx^2} = h * p [T(x) - T_\infty]$$
 (II.14)

Donc :

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{h * p}{\lambda A} [T(x) - T_\infty] = 0$$
 (II.15)

Posons :

$$m = \sqrt{\frac{h * p}{\lambda * A}} \text{ et } \theta = [T(x) - T_\infty]$$
 (II.16)

On obtient :

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} - m^2 \theta = 0$$
 (II.17)

C'est une équation différentielle du second ordre linéaire et homogène à coefficients constants, admet une solution générale de la forme :

$$\text{Ou : } \begin{cases} \theta = A * \text{ch}(mx) + B * \text{sh}(mx) \\ \theta = C * \exp(mx) + D * \exp(-mx) \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Les constantes A et B ou C et D sont déterminées à partir des conditions aux limites à la base et l'extrémité de l'ailette.

Dans Le cas :

Bout d'ailette isolé

$$\begin{cases} x = 0 : \theta(0) = (T(0) - T_{\infty}) = \theta_0 \dots \dots \dots (a) \\ x = l : \left(\frac{dT}{dx}\right) = 0 \Rightarrow \frac{d\theta}{dx} = 0 \dots \dots \dots (b) \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Nous avons (II.18) : $\theta = A * \text{ch}(mx) + B * \text{sh}(mx)$

$$(a) \Rightarrow A = \theta_0 \quad (\text{II.20})$$

$$(b) \Rightarrow [\theta_0 * m * \text{sh}(m\ell) + B * m * \text{ch}(m\ell)] \Rightarrow B = -\theta_0 \frac{\text{sh}(m\ell)}{\text{ch}(m\ell)} \quad (\text{II.21})$$

$$\Rightarrow B = -\theta_0 \text{th}(m\ell) \quad (\text{II.22})$$

Le champ de température à l'intérieur de l'ailette (II.20) et (II.21) est donné par équation suivantes :

$$\theta = \theta_0 \text{ch}(mx) - \theta_0 \frac{\text{sh}(m\ell)}{\text{ch}(m\ell)} \text{sh}(mx) \quad (\text{II.23})$$

On obtient :

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{\text{ch}[m(\ell-x)]}{\text{ch}(m\ell)} \quad (\text{II.24})$$

Le flux de chaleur total dissipé s'écrit :

$$\Phi = -\lambda * A \left(\frac{dT}{dx}\right) \quad (\text{II.25})$$

$$\Phi = -\lambda * A \left(-\theta_0 m \frac{\text{sh}[m(\ell-x)]}{\text{ch}(m\ell)}\right) \quad (\text{II.26})$$

$$\Phi = \lambda * A * \theta_0 * m \text{th}(m\ell) \quad (\text{II.27})$$

II.3.2 Les données du problème

a. La carcasse

Paramètre	Symbole	valeur	Unité
Diamètre extérieur	D	0.156	m
Longueur	L	0.192	m
Température final	T_{∞}	33	°C
Température de carcasse	T_0	63.1	°C
Température d'encoche	T_1	77.8	°C
Rayon intérieur de stator (cuivre)	R_0	0.04425	m
Rayon extérieur de stator (Fer _ silicium)	R_1	0.059	m
Rayon intérieur de carcasse d'aluminium	R_2	0.072	m
Rayon extérieur de carcasse d'aluminium	R_3	0.078	m
Conductivité de fer _ silicium	λ_1	30	$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$
Conductivité d'aluminium	λ_2	168	$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$
Conductivité de cuivre	λ_3	401	$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$
Coefficient de convection d'air	h	300	$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$

Tableau II.1. Les données de la carcasse

b. Les ailettes

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
Epaisseur	E	0.003	m
Longueur	L_1	0.180	m
Espace entre ailettes	/	0.01	m

Tableau II.2. Les données d'ailettes

La surface de la carcasse

$$S_0 = \Pi * D * L \tag{II.28}$$

Surface des ailettes

$$S_1 = N * e * L_1 \tag{II.29}$$

Calcul de flux avec ailettes

$$\Phi = \frac{T_1 - T_0}{\frac{\ln\left(\frac{R_1}{R_0}\right)}{2 * \pi * \lambda_3 * L} + \frac{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2 * \pi * \lambda_1 * L} + \frac{\ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right)}{2 * \pi * \lambda_2 * L}} \tag{II.30}$$

La forme de résistance : chaque milieu entre deux rayons en présente une résistance

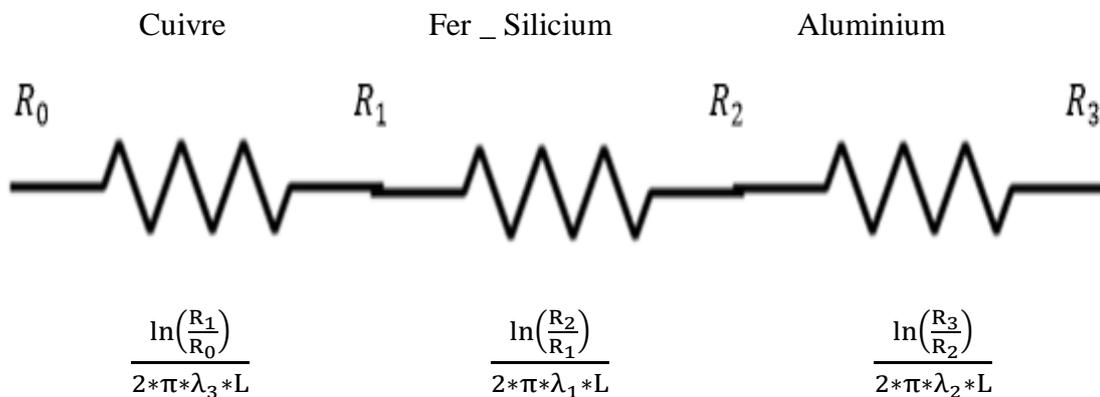


Figure II.6. Etude des résistances

Flux entre les ailettes

$$\Phi_{AE} = h * S_2 * (T_0 - T_{\infty}) \tag{II.31}$$

La surface entre ailette

$$S_2 = S_0 - S_1 \tag{II.32}$$

Flux des ailettes

$$\Phi_{AT} = \Phi - \Phi_{AE} \tag{II.33}$$

Flux d'une ailette

$$\Phi_{A1} = \frac{\Phi_{AT}}{N} \tag{II.34}$$

Calcul la hauteur d'ailette

Bout isolé :

$$\Phi_{A1} = \lambda * A * m * (T_0 - T_{\infty}) * m\ell \tag{II.35}$$

Calcul section

$$A = e * L_1 \tag{II.36}$$

Avec :
$$m = \sqrt{\frac{h \cdot P}{\lambda_2 \cdot A}} \quad (II.37)$$

Périmètre d'ailette

$$P_A = (e \cdot L_1) \cdot 2 \quad (II.38)$$

D'après (II.35)

$$\tanh mh = \frac{\Phi_{A1}}{\lambda \cdot A \cdot m (T_0 - T_\infty)} \quad (II.39)$$

II.4 Résultats

a. La carcasse

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
surface de la carcasse	S_0	0.0941	m^2
flux avec ailettes	Φ	2671.7	W

Tableau II.3. Résultats de la carcasse

b. Les ailettes

Paramètre	symbole	Valeur	Unité
Nombre des ailettes	N	44	/
Surface d'ailette	S_1	0.0238	m^2
Surface entre les ailettes	S_2	0.0703	m^2
Flux entre les ailettes	Φ_{AE}	635.1430	W
Flux des ailettes	Φ_{AT}	2036.5	W
Flux d'une ailette	Φ_{A1}	46.2852	W
Section	A	0.00054	m
Périmètre d'ailette	P_A	0.366	m
Constant	m	34.7896	/
la hauteur d'ailette	ℓ	15.3	mm

Tableau II.4. Résultats des ailettes

II.5 Conclusion

Le refroidissement des moteurs est essentiel pour maintenir une température optimale, améliorer l'efficacité énergétique, prolonger la durée de vie et réduire les émissions nocives. Les moteurs génèrent une grande quantité de chaleur pendant leur fonctionnement, ce qui nécessite un système de refroidissement efficace pour maintenir la température à un niveau optimal. Dans ce chapitre nous avons passé en revue les différentes méthodes de refroidissement des moteurs électriques. Nous avons par la suite abordé le calcul des ailettes en prenant comme cas de calcul un moteur asynchrone de 3 kW fabriqué par Electro-Industries d'Azazga. Dans ce qui suit nous allons exploiter les résultats de ce calcul dans la conception assistée par ordinateur du même moteur.

CHAPITRE III

Simulation magnétothermique d'un moteur asynchrone de 3kW

III.1 Introduction

La méthode des éléments finis est une méthode largement utilisée dans la modélisation des machines électriques ; et ce pour résoudre des équations différentielles décrivant la distribution du champ magnétique et de la température dans ces machines.

Dans notre cas, nous souhaitons utiliser le logiciel Motor-CAD pour simuler le comportement magnétique et thermique d'un moteur asynchrone de 3 kW, Motor-CAD est un logiciel de modélisation spécialement conçu pour les moteurs électriques, qui permet de simuler leurs performances électromagnétiques et thermiques.

Nous pouvons simuler le comportement du moteur en fonctionnement normal en analysant le champ magnétique et en répartissant la température entre les différentes parties du moteur. Cela permet d'évaluer les performances électromagnétiques et thermiques du moteur.

III.2 Principe de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis permet de résoudre des problèmes d'équations aux dérivées partielles. Le principe fondamental de cette méthode réside dans le passage du terrain continu à sa représentation discrétisée. Cela revient à découper la représentation du domaine en un ensemble de sous- domaines élémentaires appelés les éléments finis. Dans chaque élément la fonction constitution inconnue qui modélise le phénomène, est approché par une interpolation polynomiale. Cette interprétation peut être linéaire ou d'un degré plus élevé selon l'application. Les éléments finis sont des points, des parts, des triangles, des quadrilatères, etc. Ils réalisent une répartition du domaine d'étude, ils sont disjoints et leurs unions recouvrent le domaine tout entier, cette répartition est aussi appelée découpage, discrétisation ou maillage [29].

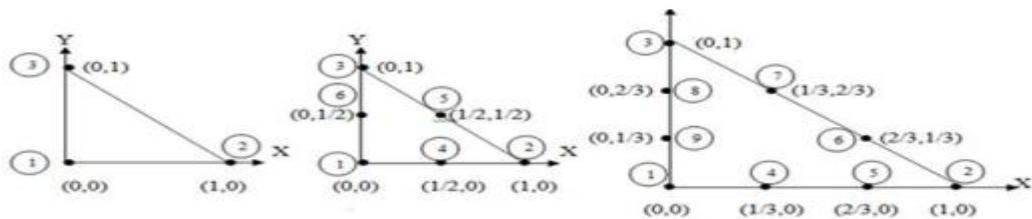
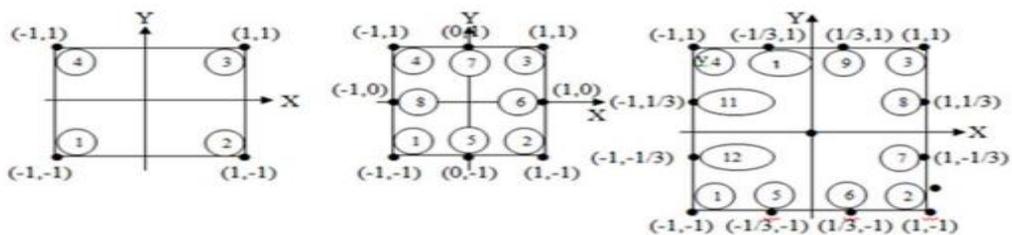


Figure III.1. Éléments 2D triangulaires



Linéaire (4 nœuds)

Quadratique (8 nœuds)

Cubique (12 nœuds)

Figure III.2. Éléments 2D carrés

Le principe de la méthode consiste à trouver la répartition des valeurs qui vérifie l'équation aux dérivées partielles du phénomène étudié et qui vérifie ses conditions aux limites (Dirichlet, Neumann, conditions cycliques).

La relative facilité de la discrétisation en éléments finis, ainsi que la grande généralité des procédures numériques associées, font que cette méthode est largement répandue dans les environnements de CAO pour les applications d'ingénierie.

III.3 Etude des phénomènes électromagnétiques

III.3.1 Equations de base

Les équations de Maxwell indiquent que toute variation spatiale ou temporelle d'un champ électromagnétique en un point de l'espace entraîne ou due à l'existence d'un autre champ au même point. Ces équations sont donc locales et sont valables dans n'importe quel système d'axes :

- **Maxwell-Gauss :**

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{III.1})$$

- **Maxwell-Faraday :**

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{III.2})$$

- **Conservation du flux :**

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{III.3})$$

- **Maxwell-Ampère :**

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{III.4})$$

Les deux types de champs de vecteurs sont liés par les relations constitutives, dites lois de comportement, décrivant les spécificités des matériaux. Sans elles, le système (III.2) et III.4) serait indéterminé. Elles sont généralement données sous les formes suivantes :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{III.5})$$

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (\text{III.6})$$

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{III.7})$$

Dans la plupart des problèmes d'électrotechnique, aux fréquences mises en œuvre, les courants de déplacement introduits par le terme $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ sont négligés, le système est alors quasi-stationnaire. Dans ces conditions, on obtient la forme locale du théorème d'Ampère :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} \quad (\text{III.8})$$

Ce qui induit la conservation de la densité de courant :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{J} = 0 \quad (\text{III.9})$$

III.3.2 Formulation électrique $\vec{A} - V$

Ce modèle de formulation utilise le potentiel vecteur magnétique A dans tout le domaine comportant les régions conductrices et non conductrices et le potentiel scalaire électrique seulement dans les régions conductrices.

En reprenant l'équation (II.3), on peut démontrer que l'induction magnétique \vec{B} peut être considérée comme le rotationnel d'un potentiel vecteur magnétique \vec{A} tel que :

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \quad (\text{III.10})$$

De même en remplaçant (II.10) dans (II.2) on obtient :

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (\text{III.11})$$

A partir de la relation précédente, nous pouvons définir un potentiel scalaire électrique v donné par la relation :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\vec{\nabla} V \quad \longrightarrow \quad \vec{E} = -\vec{\nabla} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{III.12})$$

La combinaison des équations (II.12) et (II.7) nous donne :

$$\vec{J} = \sigma \left(-\vec{\nabla} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \quad (\text{III.13})$$

L'équation magnétodynamique en termes de potentiel vecteur magnétique et en potentiel scalaire électrique s'écrit :

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) + \sigma \left(\vec{\nabla} V + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = \vec{J}_s \quad (\text{III.14})$$

A cette équation s'ajoute la conservation de la densité de courant :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = \vec{\nabla} \cdot \left[-\sigma \left(\vec{\nabla} V + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \right] = 0 \quad (\text{III.15})$$

Le potentiel vecteur n'étant défini qu'à un gradient près ($\vec{A} = \vec{A}_0 + \vec{\nabla} V$), l'unicité du potentiel doit être assurée par l'utilisation d'une jauge. En $\vec{A} - V$ la jauge de Coulomb semble être la plus efficace :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0 \quad (\text{III.16})$$

Cette jauge est introduite par pénalité en ajoutant le terme :

$$\overrightarrow{-\nabla \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \cdot \vec{A} \right)} \quad (\text{III.17})$$

Nous obtenons le système d'équations électromagnétiques symétrique à résoudre, dit formulation $\vec{A} - V$:

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) - \overline{\nabla \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \cdot \vec{A} \right)} + \sigma \left(\overline{\nabla \vec{V}} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = \vec{j}_s \quad (\text{III.18})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \left[-\sigma \left(\overline{\nabla \vec{V}} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \right] = 0 \quad (\text{III.19})$$

Les équations des machines asynchrones à cage pour différentes régions :

- **Au niveau la feuille statoriques**

$$\vec{\nabla} \wedge \left[\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right] + \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (\text{III.20})$$

- **Au niveau d'encoche statoriques**

$$\vec{\nabla} \wedge \left[\frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right] = \vec{j}_{\text{ext}} \quad (\text{III.21})$$

- **Au niveau d'entrefer**

$$\vec{\nabla} \wedge \left[\frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right] = 0 \quad (\text{III.22})$$

- **Au niveau feuille rotoriques**

$$\vec{\nabla} \wedge \left[\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right] + \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (\text{III.23})$$

- **Au niveau des barres rotoriques**

$$\vec{\nabla} \wedge \left[\frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right] + \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (\text{III.24})$$

III.4 Présentation de la machine étudiée

Le moteur étudié est un moteur asynchrone tétra polaire de 3 kW, fabriqué par la Société Electro-Industries d'Azazga. Les paramètres géométriques et physiques de la machine sont donnés par le tableau (III.1) :

Paramètres	Symbole	Valeur	Unité
Puissance nominale	P_N	3	kW
Courant nominale	I_N	7	A
Tension nominale	U_N	400	V
Couple nominale	C_N	20,10	N.m
Vitesse de rotation	N_N	1425	tr/min
La fréquence	F	50	Hz
Nombre de phase	m_1	3	-
Nombre de pole	2p	4	-
Couplage électrique	-	Δ	-
Classe d'isolation	-	F(155°)	-

Tableau III.1. Cahier de charges de la machine étudiée

**Le coté travail****le coté ventilation****Le stator placé dans la carcasse****Le rotor****Figure III.3.** Moteur asynchrone à cage d'écureuil 3 kW

III.5 Présentation du logiciel Ansys-Motor-CAD

Motors-CAD est un logiciel composé de quatre modules. Ils permettent de dimensionner et de simuler les moteurs électriques d'un point de vue : dimensions, performances et rendement. Les calculs multiphasiques sont conçus pour être interactifs et faciles à utiliser afin de raccourcir considérablement le processus de développement.

Motors-CAD optimise différents types de machines telles que les machines synchrones à aimants permanents, les machines asynchrones, les machines à réluctance variable...etc. Les

paramètres physiques de la machine à concevoir sont définis dans des fenêtres interactives. Les répartitions de champ sont disponibles grâce à la résolution par la méthode des éléments finis, avec des graphiques de résultats tels que le couple, la vitesse, les courants, la température... etc.

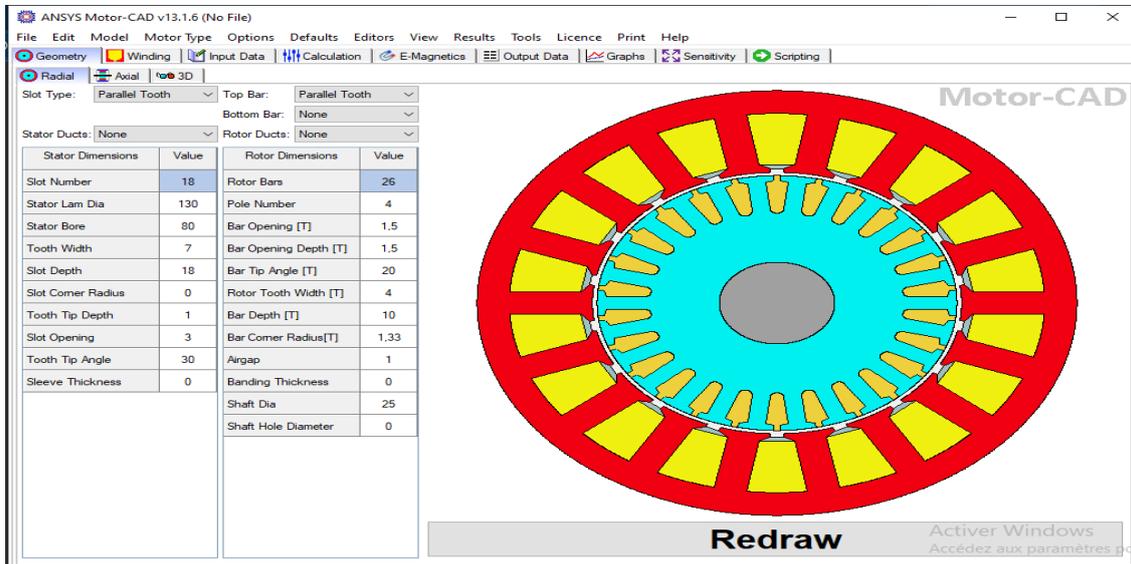


Figure III.4. Interface de logiciel

III.5.1 Géométrie de la machine

La figure (III.5) représente la géométrie de notre moteur dans l'environnement AnsysMotor-CAD. Après avoir mis en place la géométrie, les matériaux et les enroulements, La simulation électromagnétique.

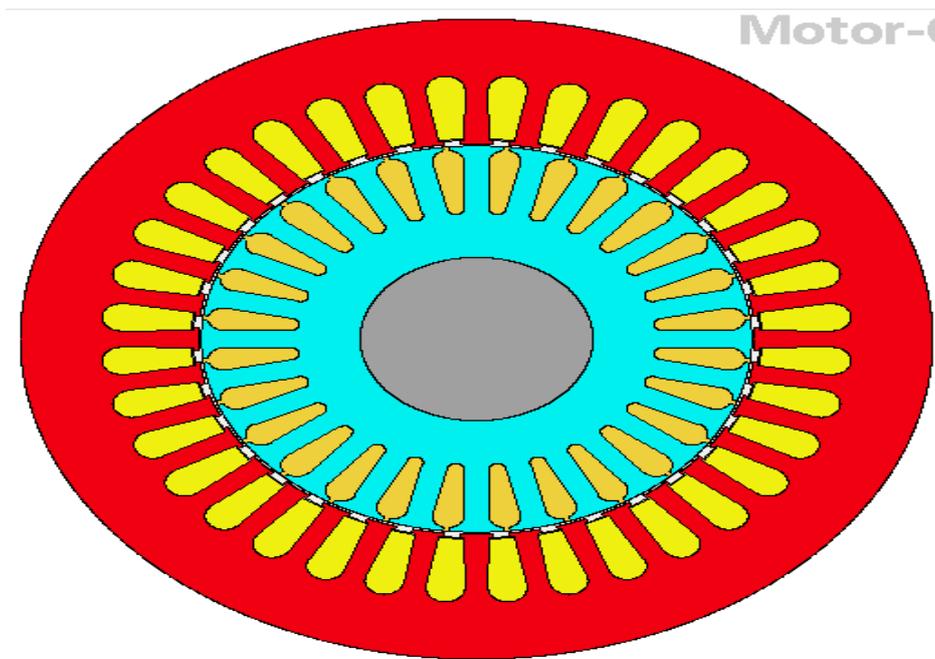


Figure.III.5.a. Géométrie radiale de moteur asynchrone à cage d'écureuil selon Ansys Motor-CAD

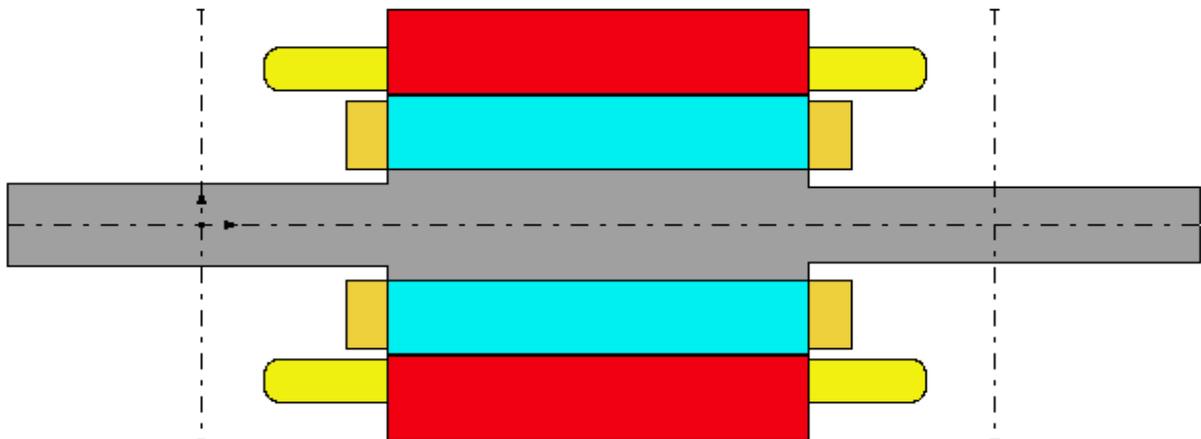


Figure.III.5.b. Géométrie axiale de moteur asynchrone à cage d'écureuil selon Ansys Motor-CAD

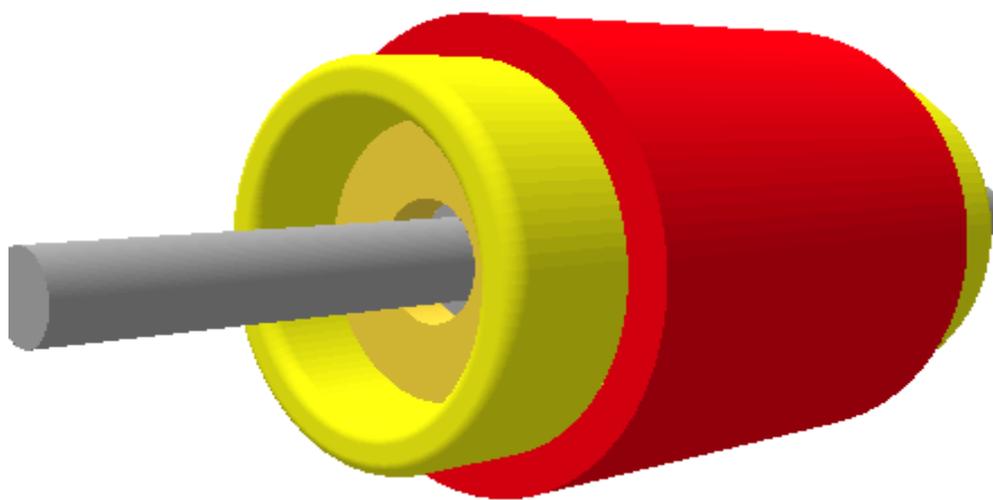


Figure.III.5.c. Vue en 3D de la machine

Figure III.5. Géométrie de la machine asynchrone à cage d'écureuil

III.6 Calcul du bobinage

Le bobinage du moteur est de type concentrique, par une simple couche et est calculé à partir des paramètres suivants :

- Z : nombre d'encoche
- $2p$: nombre de pôles
- p : nombre de paires de Pôles
- m : nombre de phase

Les formules des paramètres de construction :

$$\text{Nombre d'encoches par pôle par phase : } q = \frac{z}{2p_m} \quad (\text{III.25})$$

❖ Le pas polaire :

$$\tau_1 = \frac{z}{2p} \quad (\text{III.26})$$

✚ Facteur de bobinage

Le facteur de bobinage statoriques K_{en} devient :

$$K_{en} = K_d * K_r * K_i \quad (\text{III.27})$$

K_i : Facteur d'inclinaison des encoches statoriques $K_i = 1$ Car les encoches statoriques ne sont pas inclinée.

✚ Facteur de distribution

$$K_d = \frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{q \times \sin\left(\frac{\alpha}{2 \times q}\right)} \quad (\text{III.28})$$

α : Zone de phase

$$\alpha = q \times \gamma \quad (\text{III.29})$$

γ : Angle électrique entre deux phases

$$\gamma = \frac{p \times 36}{z} \quad (\text{III.30})$$

✚ Coefficient de raccourcissement

Le coefficient de raccourcissement K_r est défini de la manière suivante :

$$K_r = \sin\left(\frac{\beta \times \pi}{2}\right) \quad (\text{III.31})$$

Avec :

β : Rapport de raccourcissement

$$\beta = \frac{y}{\tau_1} \quad (\text{III.32})$$

Y : Pas d'enroulement

$$y = \frac{z}{2p} - \varepsilon \quad (\text{III.33})$$

ε_1 : Raccourcissement. $\varepsilon_1 = 0$

Caractéristique	Symbole	Valeur
Nombre d'encoches par pôle et par phase	q	3
Le pas polaire	p	3
Pas d'enroulement	y	9

Tableau III.2. Caractéristiques des bobines statoriques.

Les paramètres trouvés ont été appliqués pour concevoir notre bobinage sur le logiciel.

La figure (III.6) et la figure (III.7) représentent la distribution panoramique et radiale de l'enroulement.

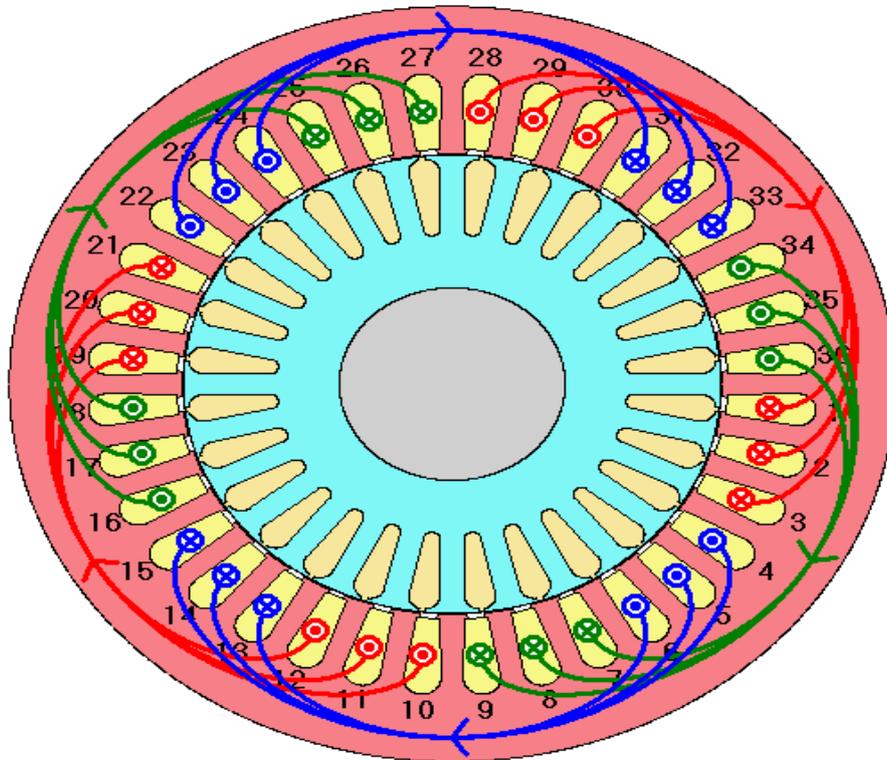


Figure III.6. Distribution radiale de bobinage.

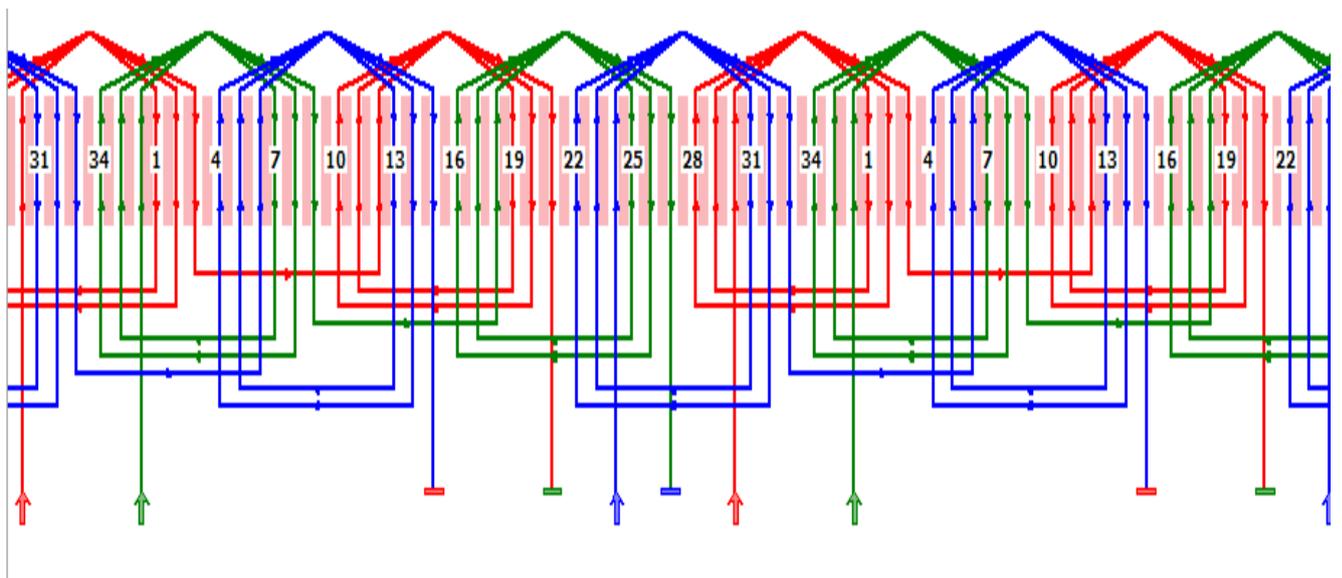


Figure III.7. Distribution panoramique du bobina.ge.

III.7 La Courbe de première aimantation

La courbe $B - H$, quant à elle, représente la relation entre l'induction magnétique (B) et le champ magnétique (H) pour un matériau de la tôle 800 – 50A . Elle décrit comment le matériau réagit à un champ magnétique externe croissant. Initialement, lorsque le champ magnétique augmente, l'induction magnétique augmente également de manière proportionnelle. Cependant, à mesure que le champ magnétique continue d'augmenter, l'induction magnétique atteint une valeur maximale, correspondant à l'état de saturation.

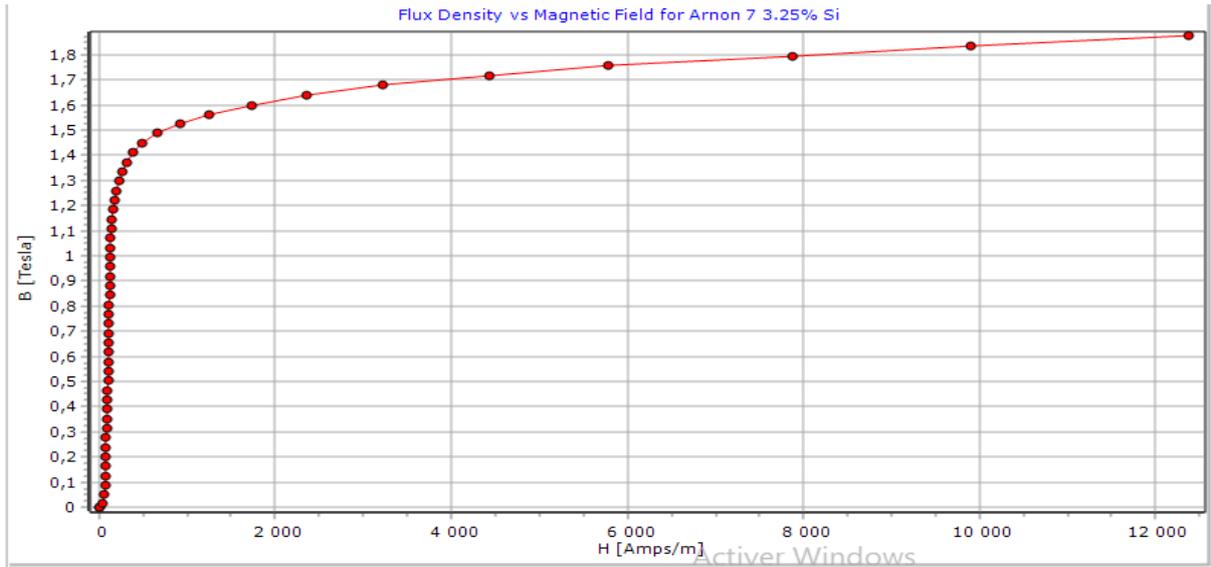


Figure III.8. Courbe de première aimantation de la tôle magnétique M800-50A

III.8 Courbe des pertes spécifiques de tôle M800-50A

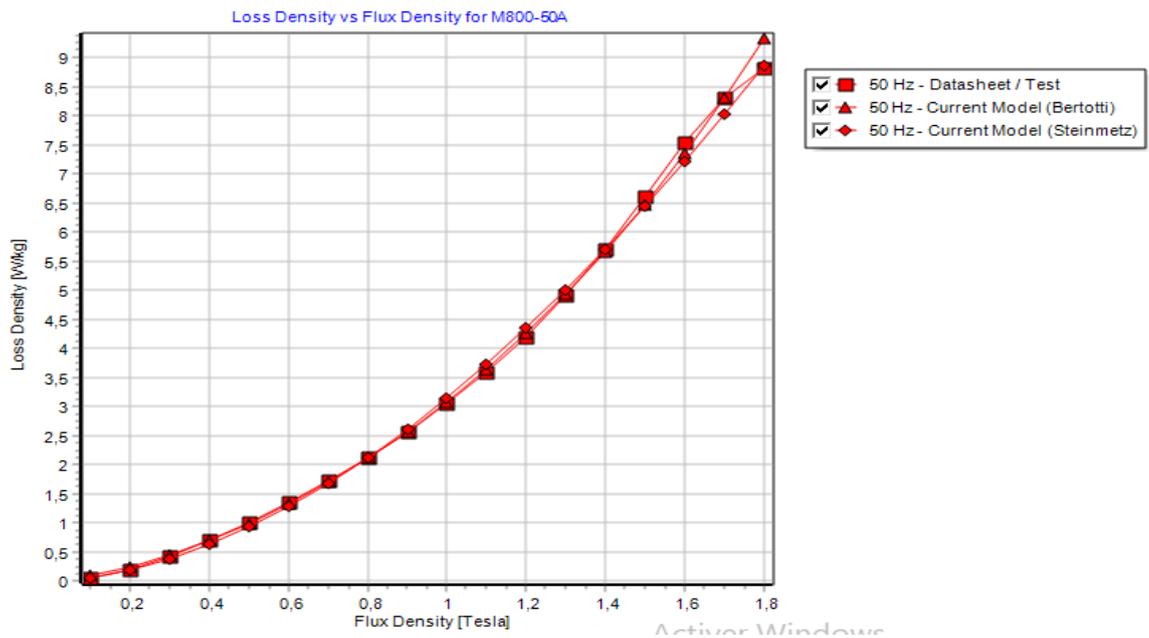


Figure III.9. Courbe des pertes spécifiques de tôle M800-50A

III.9 Le maillage

La figure (III.10) ci-dessous illustre le maillage par éléments finis du moteur, où l'on observe une plus grande finesse et concentration au niveau de l'entrefer, des dents statoriques, des barres du rotor, ainsi que dans les zones étroitement adjacentes à l'entrefer."

Motor-CAD

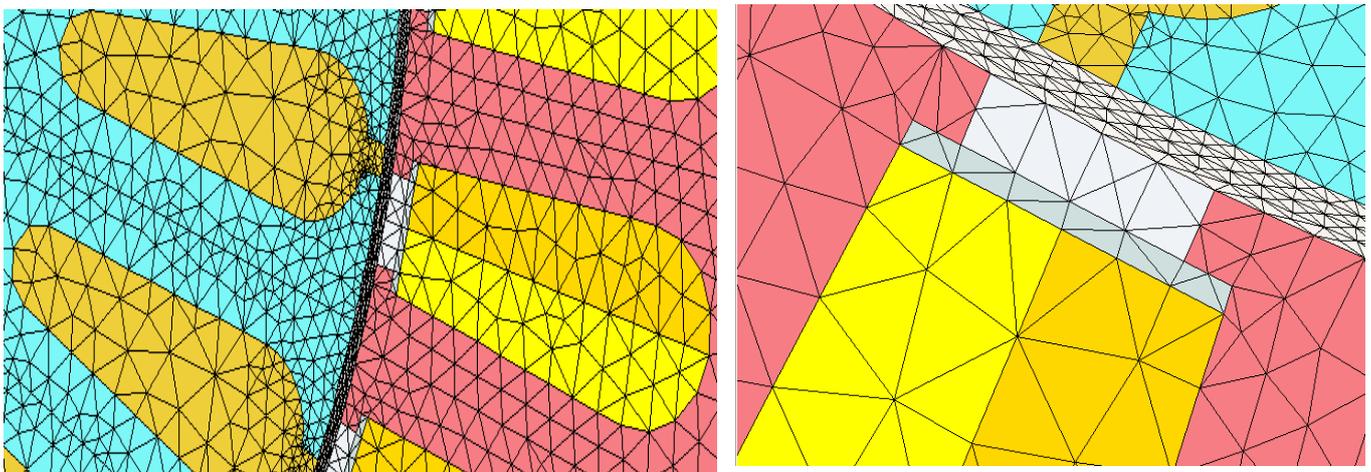
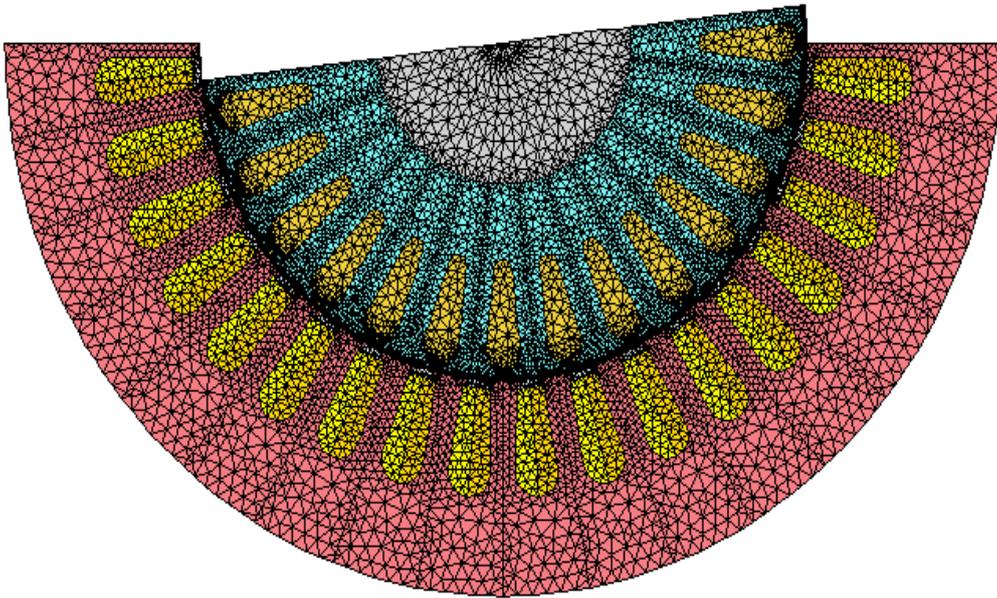


Figure III.10. Maillage de moteur.

III.10 Cartographie du champ magnétique

La cartographie d'induction révèle que la machine possède une configuration tétra polaire. Les valeurs d'induction correspondent étroitement aux valeurs injectées dans la première courbe d'aimantation

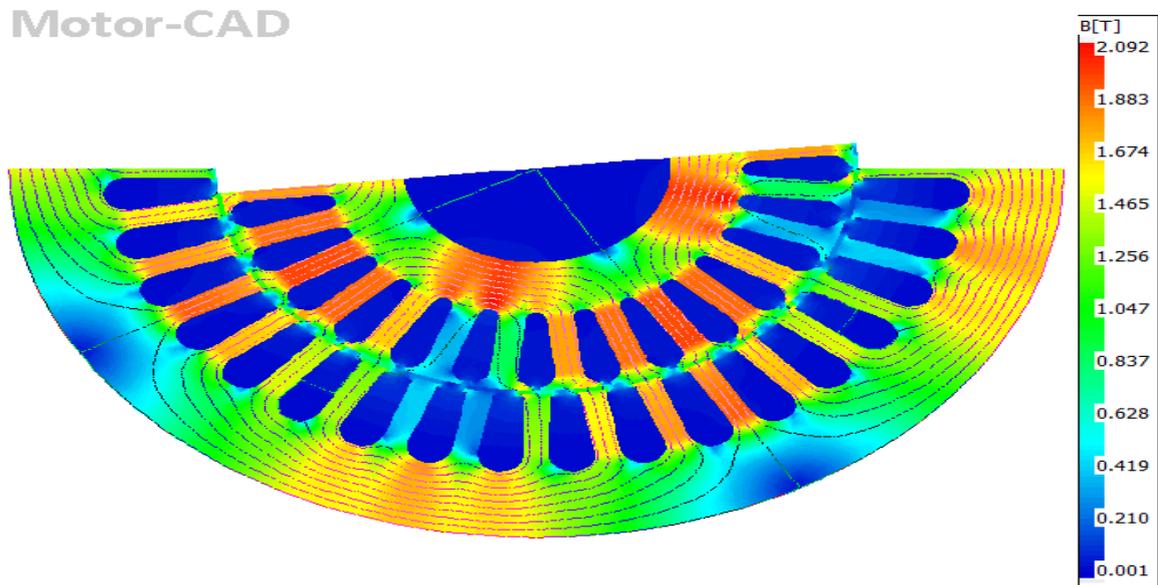


Figure III.11. L'induction magnétique

III.11 Caractéristiques électromécaniques

Les figures (III.12) et (III.13) présentent respectivement les propriétés électriques et mécaniques, du moteur. Nous pouvons voir que les vitesses obtenues coïncident à celles d'un moteur de classe F de la classification NEMA qui correspond à des moteurs asynchrones à encoches profondes.

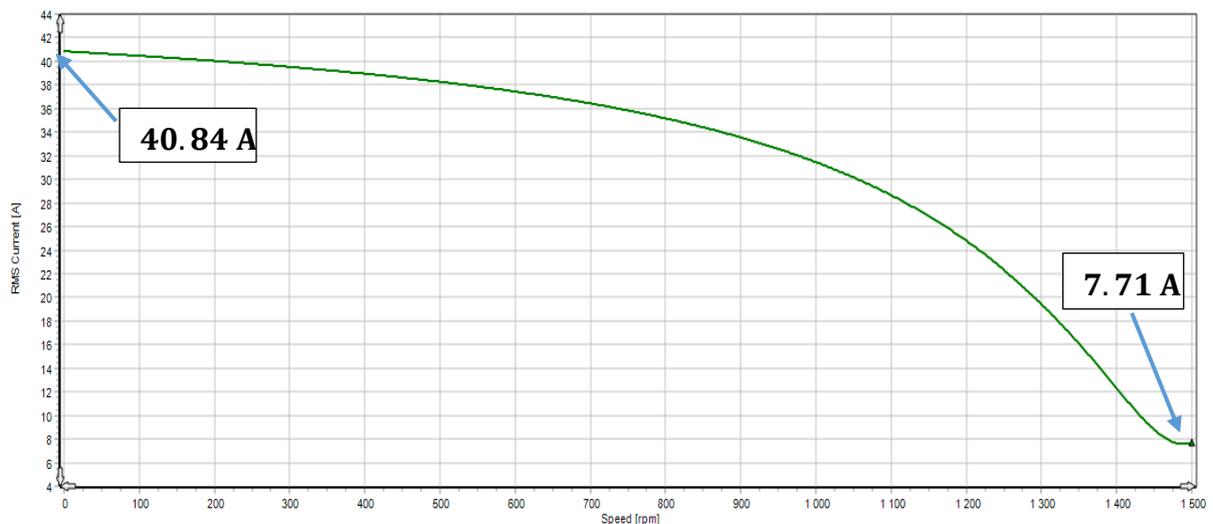


Figure III.12. Courant de ligne en fonction de la vitesse

Sur la figure (III. 12) on a le courant de démarrage qui est égale à 40.84 A et la valeur nominale de courant de ligne égale à 7.71 A.

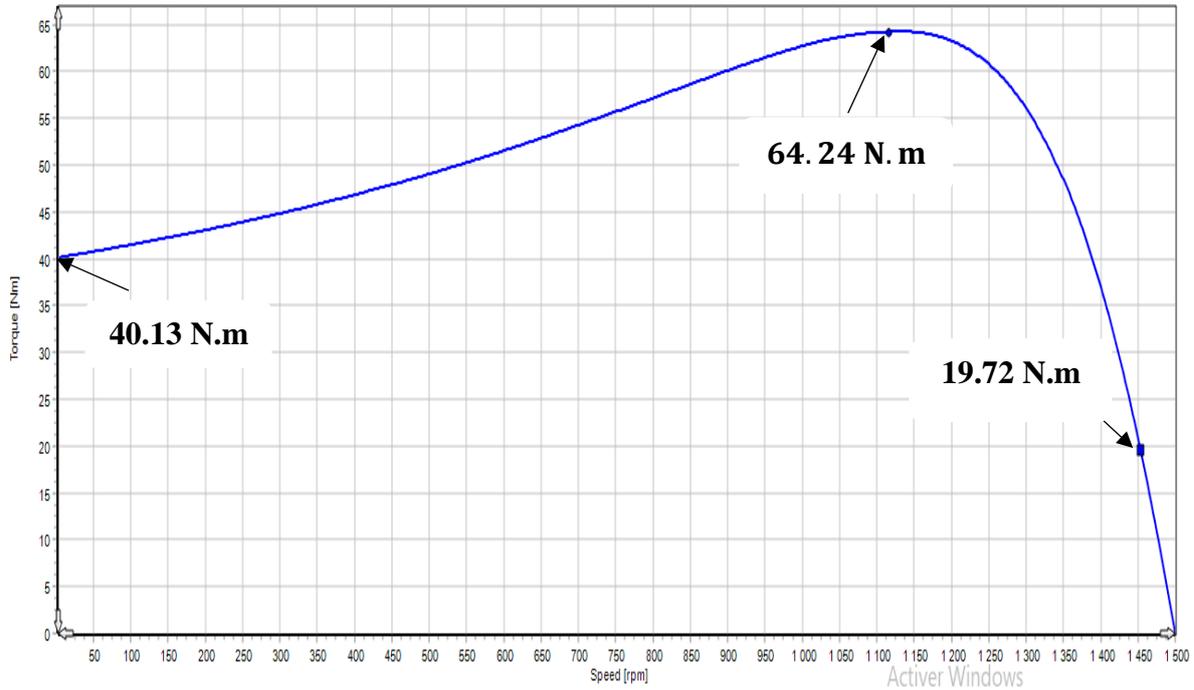


Figure III.13. Couple du moteur en fonction de la vitesse

D’après la figure (III. 13)on a le couple de démarrage du moteur égale à 40.13 N. m, le couple maximal égale à 64.24 N. m et le couple nominal de moteur égale à 19.72 N. m.

III.12 Caractéristiques magnétodynamiques

On a simulé le comportement de notre moteur en charge. Celui-ci est alimenté en triangle avec une tension de 400 Volts entre phases et chargé d'une charge égale au couple nominal. Les résultats obtenus sont donnés par les graphes suivants :

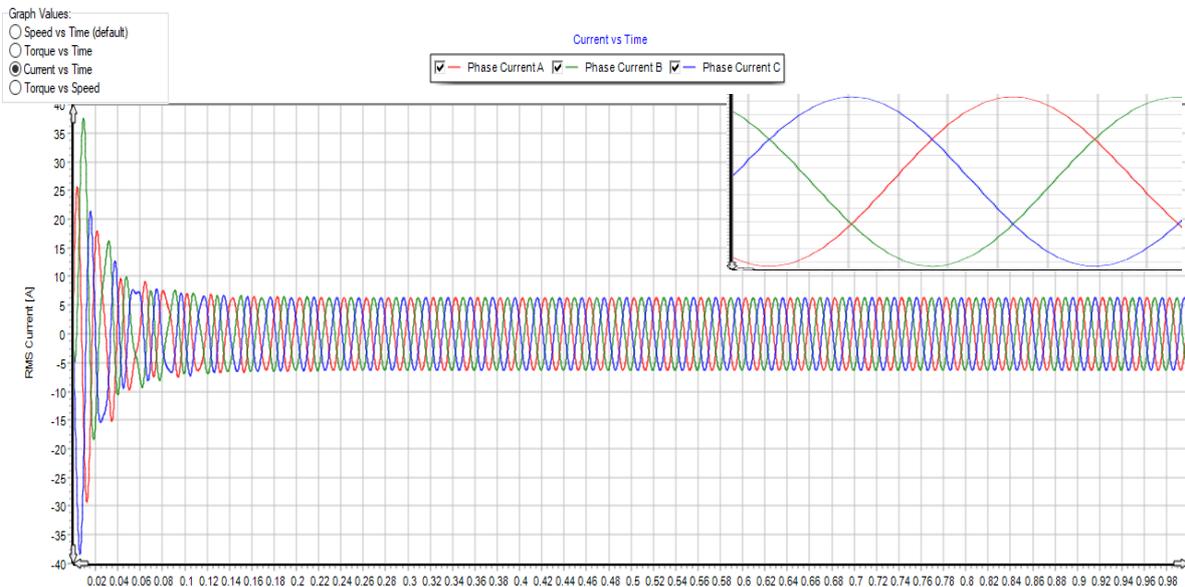


Figure III.14. Courbes des courants de phases en charge

Les courants aux bornes de la machine sont parfaitement sinusoïdaux et sont décalés 120° les uns à l'autre. Ils ont la même valeur maximale et sont bien équilibrés.

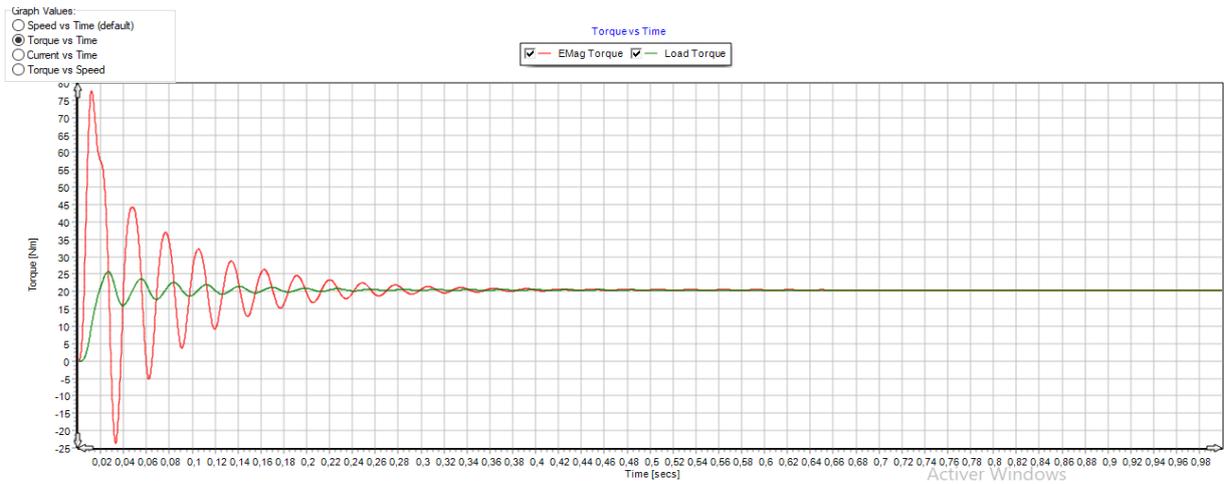


Figure III.15. Courbe de variation de couple en fonction de temps

La courbe du couple en fonction du temps montre que le moteur simulé répond bien à l'application du couple de charge.

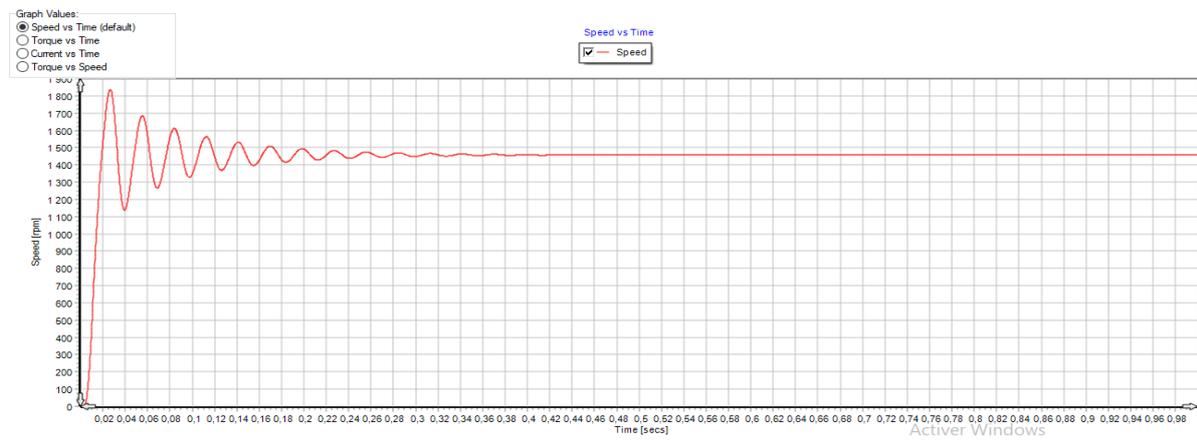


Figure III.16. Courbe de vitesse de rotation en fonction de temps

À partir des trois graphiques précédents, il convient de noter que notre conception est conforme au principe de fonctionnement du moteur asynchrone étudié, et les valeurs simulées correspondent aux valeurs expérimentales obtenues lors des différents essais effectués à l'usine.

III.13 Induction dans l'entrefer

La figure ci-après représente la distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer de notre moteur



Figure III.17. Distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer

En observant la figure (III.17), on constate que le graphique ne présente pas une forme parfaitement sinusoïdale, ce phénomène étant attribué à la discontinuité de l'entrefer

III.14 Les pertes dans la machines

✚ Dans le stator

Les pertes			Valeur [W]
Perte joule			477.8
Pertes Fer	Par hystérésis	Dans le corps	116
		Dans les dents	56.84
	Par courants de Foucault	Dans le corps	24.48
		Dans les dents	14.65

Tableau III.3. Les pertes dans le stator

✚ Dans le rotor

Les pertes			Valeur [W]
Perte joule			210
Pertes fer	Par hystérésis	Dans le corps	0.6761
		Dans les dents	0.03325
	Par courants de Foucault	Dans le corps	3.577
		Dans les dents	4.422

Tableau III.4. Les pertes dans le rotor

III.15 Couplage magnétothermique et équations couplée

Les phénomènes magnétiques et thermiques sont souvent liés dans les dispositifs électromagnétiques. La source de chaleur est la perte Joule due à la circulation du courant. Les phénomènes thermiques dépendent donc des phénomènes électromagnétiques. Contrairement à cela, les propriétés électromagnétiques (conductivité et perméabilité) varient avec la température, les phénomènes électromagnétiques sont donc imposés aux propriétés thermiques.

L'étude des phénomènes électromagnétiques et thermiques passe par l'analyse électromagnétique et thermique. Il s'agit de résoudre un système d'équations magnétocaloriques composé d'équations électromagnétiques et d'équations thermiques, qui s'écrit comme suit [12].

$$\begin{cases} P = \sigma \omega^2 \frac{A A^*}{2} \\ \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = q + \text{div}(\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T) \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

III.16 Etude des phénomènes thermiques

Pour l'étude thermique, on a introduit la carcasse et le circuit de refroidissement utilisés dans la machine. Les figures ci-dessous représentent les le moteur avec carcasse en vues radiale, axiale et 3D.

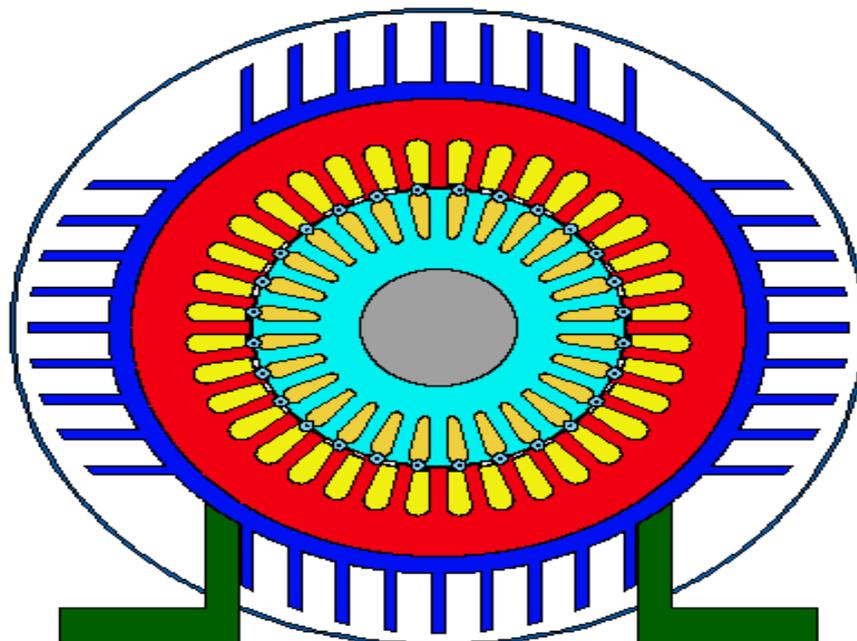


Figure III.18.a Géométrie radiale de moteur asynchrone à cage d'écureuil selon Ansys Motor-CAD.

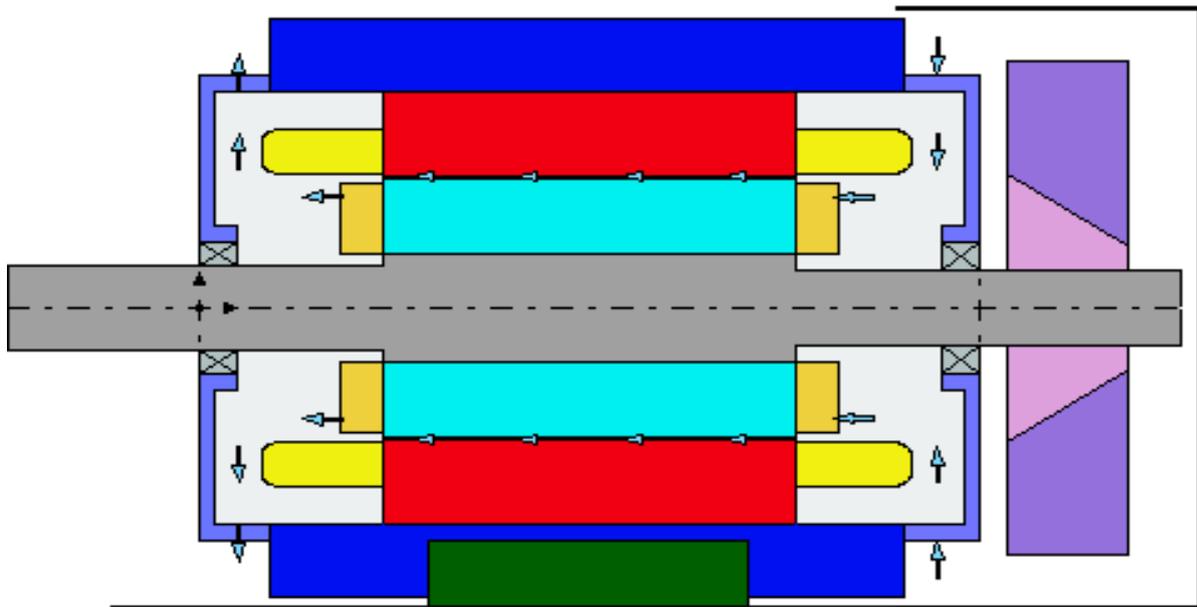


Figure III.18.b Géométrie radiale de moteur asynchrone à cage d'écureuil selon Ansys Motor-CAD.

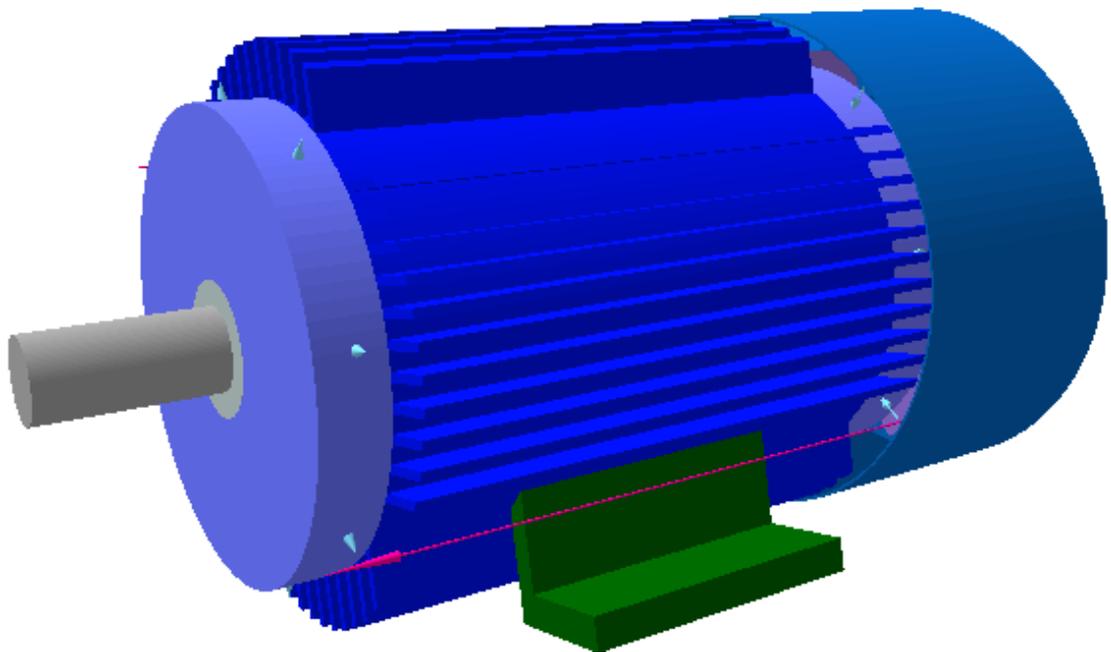


Figure III.18.c vue en 3D du moteur .

Figure III.18. Géométrie de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

III.17 Simulation sans ailettes

Dans cette application nous avons introduit la carcasse du moteur sans les ailettes. La distribution de la température ainsi que son évolution dans le temps dans différentes parties de notre moteur sont représentées dans les figures suivantes :

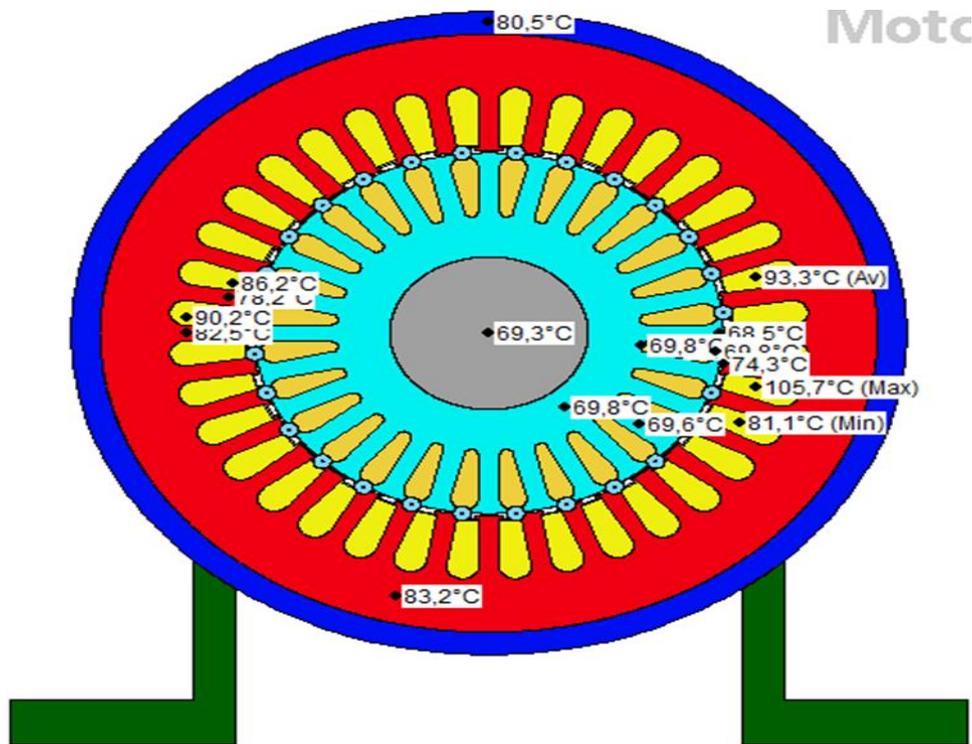


Figure III.19. Vue radiale de la distribution de température du moteur par Ansys MotorCAD.

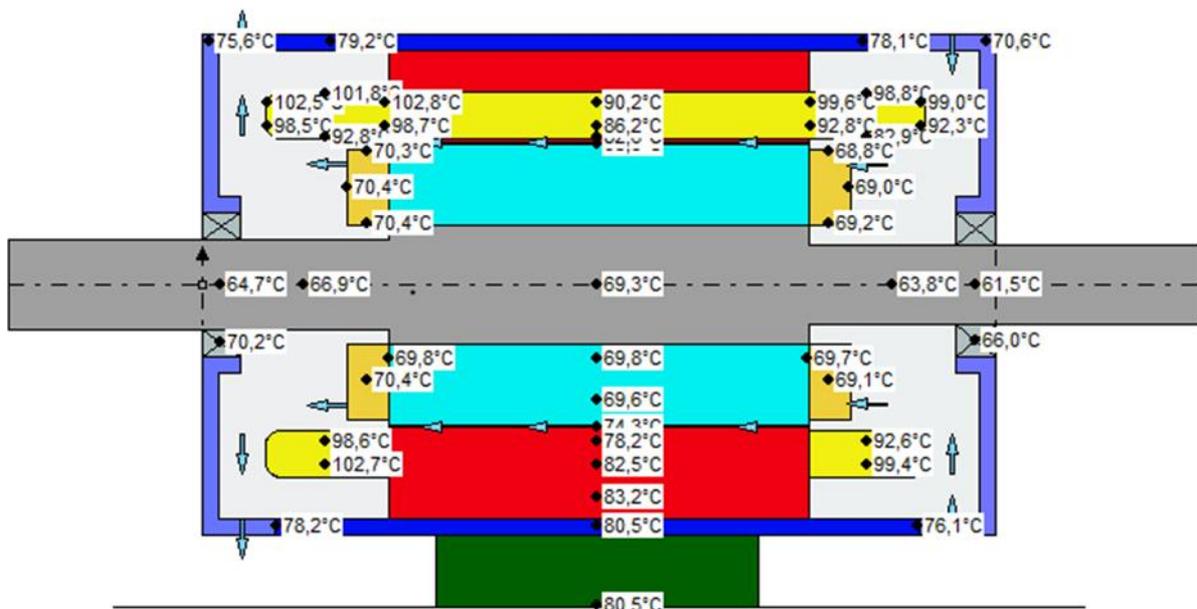


Figure III.20. Vue axiale de la distribution de température du moteur de test par Motor-CAD.

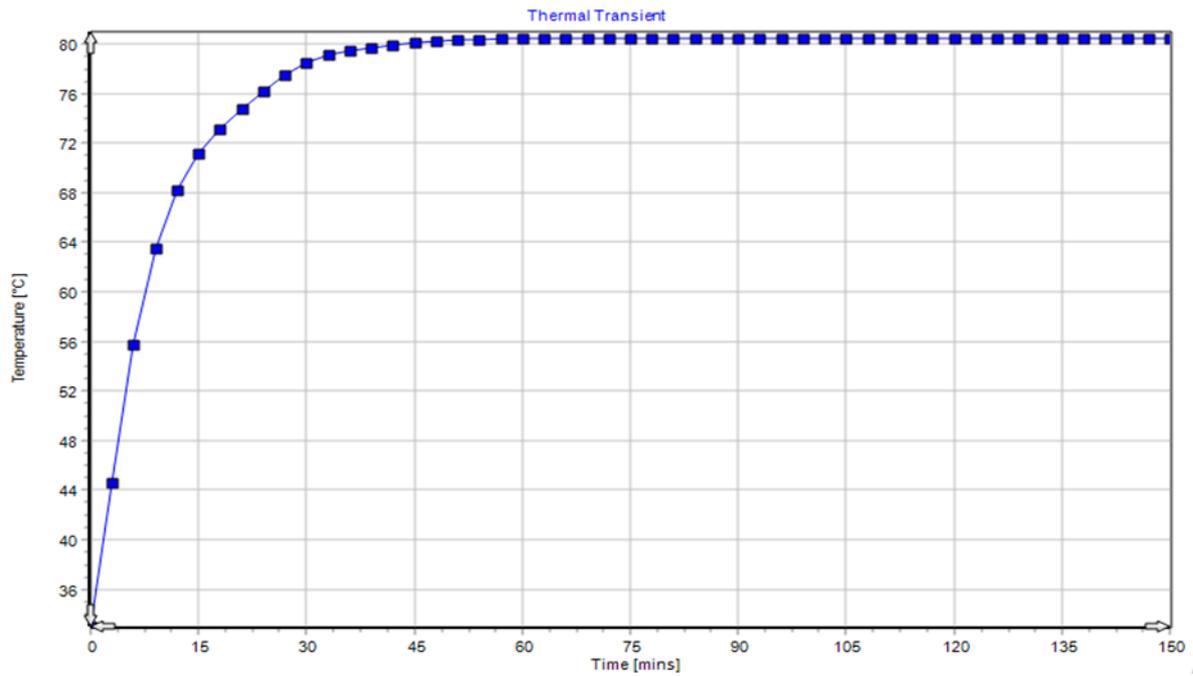


Figure III.21. Variation de la température dans la carcasse du moteur sans les ailettes.

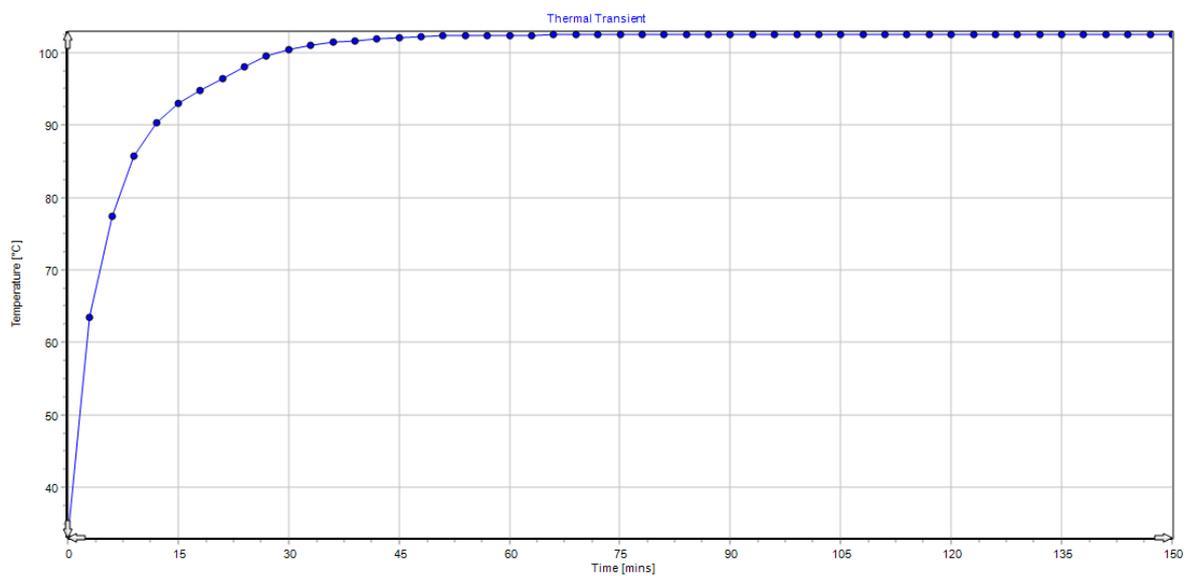


Figure III.22. Variation de la température dans les têtes de bobines sans ailettes.

D'après les résultats, nous remarquons que la température à dépasser les 100°C dans les têtes de bobines ce qui va réduire considérablement la durée de vie de notre moteur. Pour y remédier nous allons introduire les ailettes et refaire les simulations.

III.18 Simulation avec ailettes

Dans cette application nous avons rajouté les ailettes à notre carcasse. Les dimensions de ces dernières sont issues du calcul analytique effectué dans le chapitre précédent. La distribution de la température ainsi que son évolution dans le temps dans différentes parties de notre moteur sont représentées dans les figures suivantes :

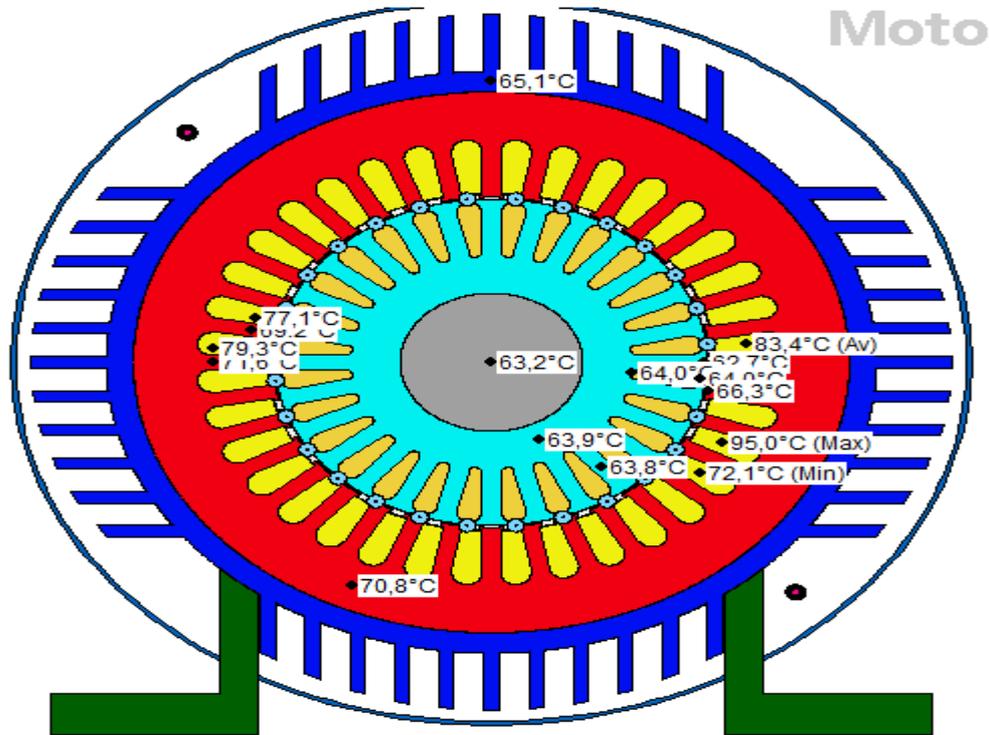


Figure III.23. Vue radial de distribution des températures.

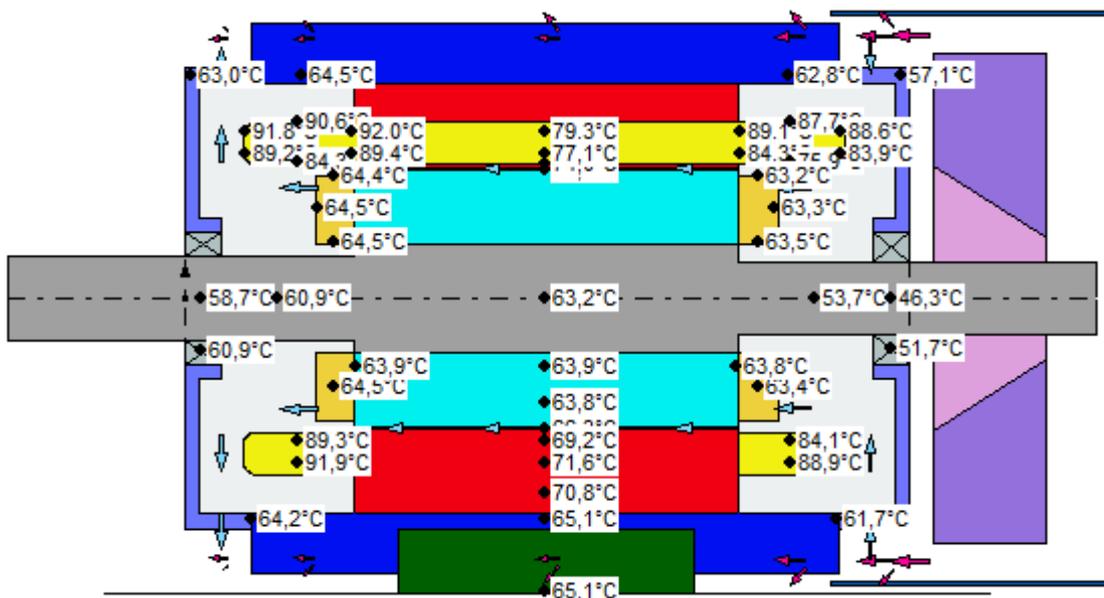


Figure III.24. Vue axiale de distribution de la température.

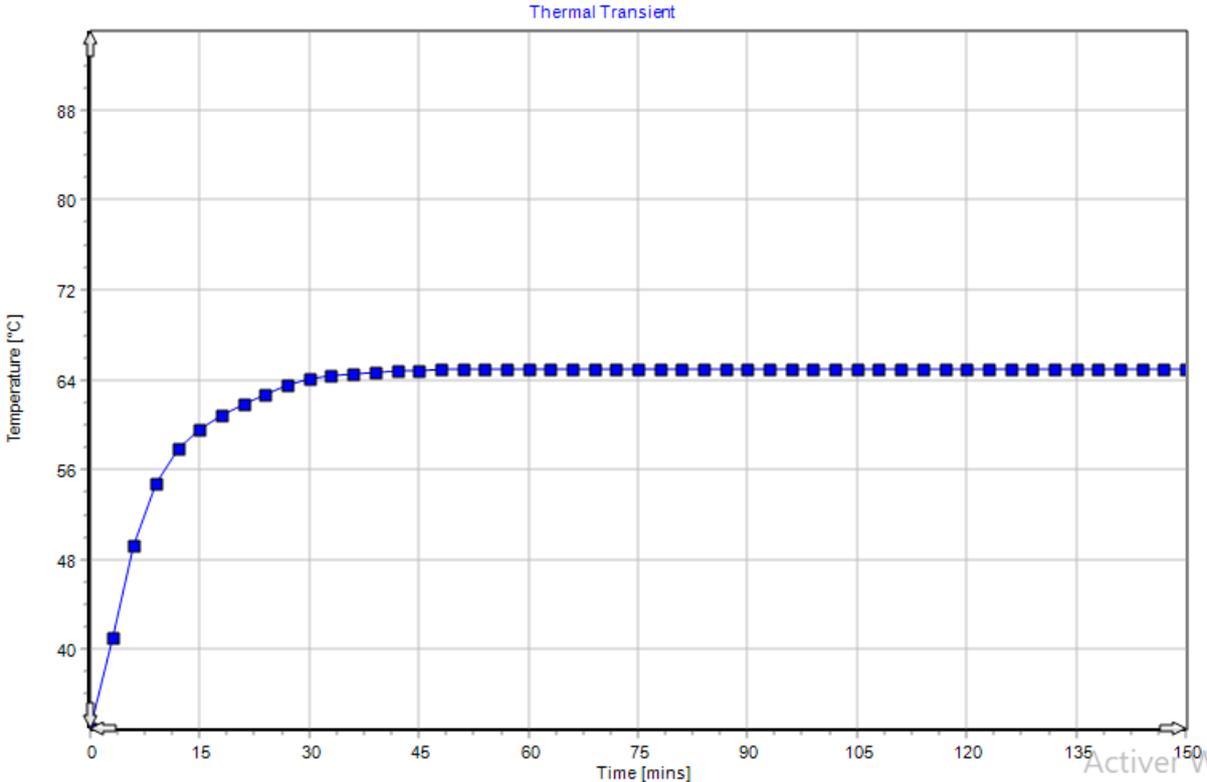


Figure III.25. Variation de la température dans la carcasse du moteur.

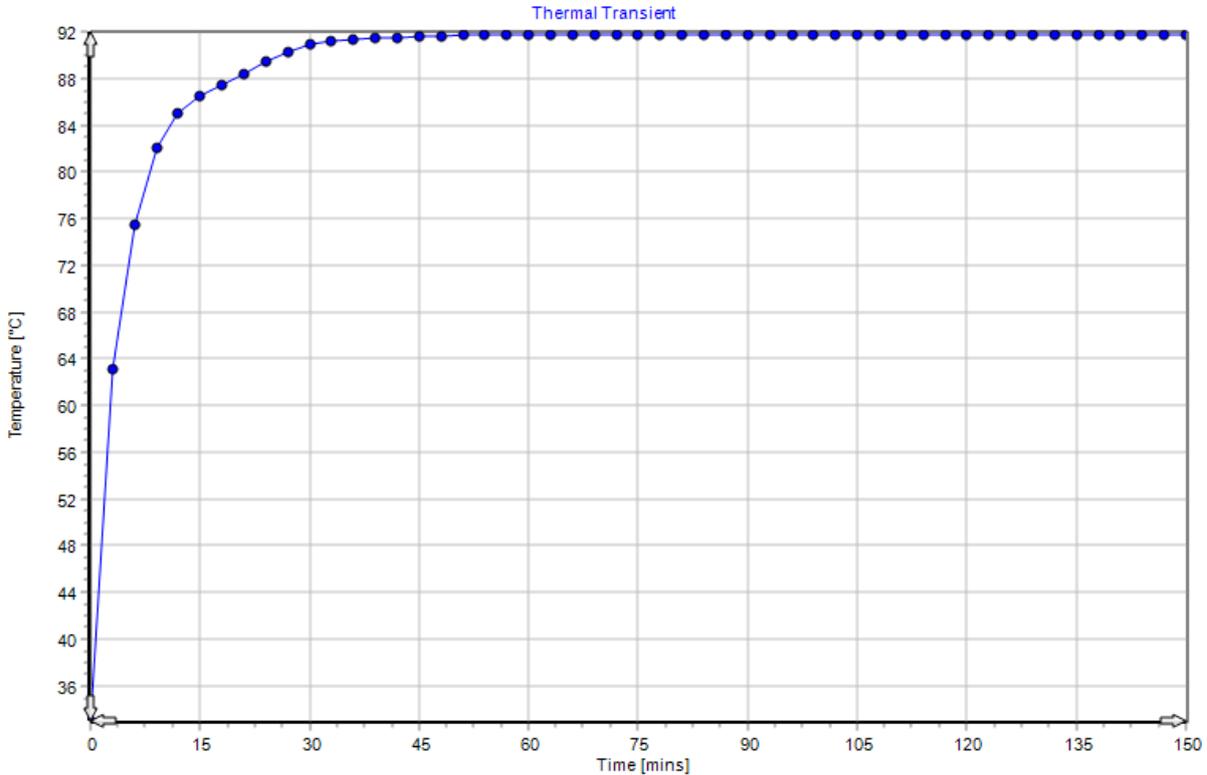


Figure III.26. Variation de la température dans les têtes de bobines.

Nous remarquons que l'introduction des ailettes a fait baisser la température de notre moteur à un niveau raisonnable et que les températures obtenues correspondent à celle mentionnées dans les PV des essais thermiques à l'usine.

III.19 Conclusion

Dans ce chapitre on a simulé un moteur asynchrone de 3kW et fait son analyse électromagnétique et thermique.

Cette simulation nous permet d'obtenir la distribution de la température dans les différentes zones de notre moteur et voir la différence de cette distribution dans les cas avec et sans les ailettes.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les moteurs utilisés dans diverses applications, tels que les automobiles, l'équipement industriel ou les machines fixes, génèrent une quantité considérable de chaleur pendant leur fonctionnement. Cette chaleur résulte de la combustion du carburant et du frottement des pièces mobiles à l'intérieur du moteur. Si cette chaleur excessive n'est pas correctement contrôlée et dissipée, elle peut entraîner des problèmes graves tels que la détérioration des composants, la perte d'efficacité et même des dommages irréparables. Par conséquent, il est essentiel de disposer d'un système de refroidissement efficace et fiable pour maintenir la température du moteur à un niveau optimal et assurer des performances optimales. Dans cette présentation, nous allons explorer les principes du refroidissement des moteurs et les différentes méthodes utilisées pour y parvenir.

En conclusion générale, le phénomène thermique dans la machine joue un rôle crucial dans son fonctionnement, ses performances et sa durabilité. Comprendre et gérer efficacement ce phénomène est essentiel pour garantir un fonctionnement fiable et efficace de la machine.

Les travaux présentés dans ce travail portent sur le calcul des ailettes de la carcasse d'un moteur asynchrone de 3kW fabriqué par l'entreprise nationale Electro-Industries d'Azazga. Pour vérifier la teneur des résultats de notre calcul, nous avons effectué la conception assistée par ordinateur de ce moteur.

En effet, nous avons effectué deux simulations distinctes. La première simulation, de nature magnétodynamique, avait pour objectif de déterminer les performances électromagnétiques du moteur et de visualiser la distribution du champ magnétique à l'intérieur. Ensuite, en transférant les données obtenues à partir de la simulation au solveur thermique du logiciel, nous avons pu réaliser une deuxième simulation axée sur le phénomène thermique. Cette simulation nous a permis de déterminer la distribution de la température dans les différentes zones de la machine.

Comme perspectives de ce travail, nous proposons :

- L'optimisation des différentes dimensions des ailettes
- La prise en compte des pertes mécaniques

Bibliographie

- [1] Taylor & Francis Group «the induction machine handbook » livre, 2014/01/31.
- [2] K.Seddik F.Ibersiene « Modélisation de la machine asynchrone penta phasée en régime dégradé» Mémoire de master, Tizi Ouzou, 2017.
- [3] I.djidjekh « Etude comparative des différents types de bobinage d'un moteur asynchrone triphasé à cage», Mémoire de master, Biskra, 2018.
- [4] M.M'beirick « Surveillance et diagnostic de la machine asynchrone avec défaut d'alimentation (déséquilibre de tension)» Mémoire de master, Jijel, 2019.
- [5] A.Bouguerne «Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones»» Mémoire de magister, constantine, 2009.
- [6] M.Aissaine N.Imanouine «Contrôle direct du couple d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur multi-niveaux » Mémoire de master, Blida, 2016.
- [7] W.Boudjât A.Himoura «Etude et simulation d'une machine asynchrone alimente par un Onduleur de tension à commande mli» Mémoire de master, Annaba, 2017.
- [8] A.Fasquelle «Contribution à la modélisation multi-physique : électro-vibro-acoustique et Aérothermique de machines de traction» Thèse doctorat, Lille, 2007.
- [9] H.Haddad «Etude des performances de la machine asynchrone alimentée par un onduleur Multiniveaux» Mémoire de master, Tizi Ouzou, 2013.
- [10] A.FAREDJ, ABDELALI.N, « Modélisation thermique d'une encoche statorique d'une machine asynchrone », mémoire de master professionnel, université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2016.
- [11] G.G GILLES, « Modélisation et caractérisation thermique des machines électriques synchrones à aimants permanents », Thèse doctorat, L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 27 février 2014.
- [12] D.Aliane L.Fares « Analyse magnétothermique d'un moteur asynchrone sous l'environnement Ansys Motor-CAD», Mémoire de Master, Boumerdes, 2021.
- [13] M. AMOURA « Etude électromagnétique et thermique des machines électriques », Ecole Nationale Polytechnique, 20 juin 2018.
- [14] A.Bassel « Contribution à la prise en compte des aspects thermiques des machines électriques dans un environnement mécatronique » Thèse Doctorat, UTC Compiègne, 2015.
- [15] A.Akli W.Rebhi «modélisation thermique d'un moteur asynchrone» Mémoire de Master, Tizi Ouzou, 2013.

- [16] M. Bouheraoua « Contribution à la modélisation thermique d'un moteur asynchrone à Cage » Thèse Doctorat, Tizi Ouzou, 2008.
- [17] M. F. Modest, Radiative Heat Transfer (Third Edition), Academic Press, 2013.
- [18] R. Siegel and J. R. Howell, « Thermal Radiation Heat Transfer » 5 Edition, CRC Press, 2019
- [19] B. Givoni. « Climate Considerations in Building and Urban Design ». New York, 1998.
- [20] Nicol, F., Humphreys, M. A. & Roaf.S. « Adaptive Thermal Comfort: Principles and Practice ». London, 2012.
- [21] ASHRAE Handbook - HVAC Applications. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2019.
- [22] Fairbairn, D., & Etheridge, D. «Ventilation Design in Buildings: An Integrated Approach». Abingdon, (2017).
- [23] J. P. Holman, «Heat Transfer» 2 Edition, McGraw-Hill Education, 2010.
- [24] S. Kakac, Y. Yener, and H. P. Hsieh, «Cooling of Electronic Systems», WIT Press, 2005.
- [25] Webb, D. W., and Hill, R. J. «Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design » 3 Edition, CRC Press, 2019.
- [26] Collier, J. G., and Thome, J. R. « Convective Boiling and Condensation » 5 Edition, Oxford, UK: Oxford University Press, 2017.
- [27] Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., and Lavine, A. S. « Fundamentals of Heat and Mass Transfer » 6 Edition. Wiley, 2006.
- [28] Kays, W. M., Crawford, M. E., and Weigand, B « Convective Heat and Mass Transfer » 5 Edition. McGraw-Hill Education, 2005.
- [29] Mme Souad BADACHE « Cours échauffement et refroidissement des actionneurs électromécaniques' Destiné aux étudiants en Master2 », 2020/2021.
- [30] A.AYADI, Y. SAADI, «Dimensionnement et analyse des performances d'un moteur asynchrone à double cage de 250kW», Mémoire de Master, boumerdes, 2019/2020.

Résumé

ملخص

لآلة غير المتزامنة هي محرك كهربائي يستخدم على نطاق واسع، لكن أدائها يتأثر بالظاهرة الحرارية. الإدارة الفعالة لهذه الظاهرة ضرورية لضمان التشغيل السليم للآلة وتحسين أدائها. تعد النمذجة الحرارية والمحاكاة أدوات قيمة لتحليل وتحسين توزيع درجة الحرارة داخل المحرك. اعتماد تقنيات التبريد المناسبة والاستفادة المثلى من التصميم الهدف من هذا العمل هو تصميم زعانف محرك غير متزامن بقوة 3 كيلو وات. بعد إجراء الحساب التحليلي، مع مراعاة جميع المواد المستخدمة، تم تنفيذ التصميم بمساعدة الكمبيوتر للآلة 'انسيس موتور-كاد' و النمذجة العددية في جميع الإعدادات الهندسية للآلة. سمح التحليل المغناطيسي الحراري للمحرك بالحصول على توزيع درجة الحرارة في المناطق المحترمة. النتائج التي تم الحصول عليها متسقة مع تلك التي قدمتها الشركة المصنعة.

الكلمات المفتاحية

آلة غير متزامنة، ظاهرة حرارية، آلات تبريد، زعانف، نمذجة حرارية مغناطيسية

Résumé

La machine asynchrone est un moteur électrique largement utilisé, mais sa performance est influencée par le phénomène thermique. La gestion efficace de ce phénomène est essentielle pour garantir le bon fonctionnement de la machine et améliorer ses performances. La modélisation et la simulation thermique sont des outils précieux pour analyser et optimiser la distribution de la température à l'intérieur du moteur. En adoptant des techniques de refroidissement appropriées et en optimisant la conception

L'objectif de ce travail est le dimensionnement des ailettes d'un moteur asynchrone de 3 kW. Après avoir fait le calcul analytique, une modélisation numérique a été effectuée sous l'environnement ANSYS Motor-CAD, une conception assistée par ordinateur de la machine a été réalisée en tenant compte de tous les matériaux utilisés et de tous les paramètres géométriques de la machine. L'analyse magnétothermique du moteur a permis l'obtention de la distribution de température dans les différentes régions. Les résultats obtenus concordent bien avec ceux fournis par le fabricant.

Mots-clés

Machine asynchrone, phénomène thermique, refroidissement des machines, ailettes, modélisation magnétothermique.

Abstract

The asynchronous machine is a widely used electric motor, but its performance is influenced by the thermal phenomenon. Effective management of this phenomenon is necessary to ensure the proper operation of the machine and improve its performance. Thermal modeling and simulation are valuable tools for analyzing and optimizing the temperature distribution inside the engine. Adopting appropriate cooling techniques and optimizing the design.

The aim of this work is to design the fins of a 3 kW asynchronous motor. After performing the analytical calculation, numerical modelling was performed in the ANSYS Motor-CAD, a computer-aided design of the machine was carried out taking into account all the materials used and all the geometric parameters of the machine. Magnetothermal analysis of the engine allowed the temperature distribution to be obtained in the deferential regions. The results obtained are consistent with those provided by the manufacturer.

Keywords

asynchronous machine, thermal phenomenon, cooling machines, fins, magnetothermal modelling.