

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

KHALFI Abdessalam

BOUTRIK Khaled

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machines Electriques

**Impact des défauts sur le comportement thermique des
moteurs asynchrones**

Soutenu le 06 / 07/2022 devant le jury composé de :

M'ZIOU	Nassima	Professeur	UMBB	Président
LARABI	Zina	MAA	UMBB	Examineur
HAMEL	Meziane	MCA	UMBB	Encadreur
Mansour	Mourad	Ingénieur	Electro-industries	Co-encadreur

Année Universitaire : 2021/2022



Remerciements

Remerciements

Tout d'abord, nous aimerions remercier Allah le tout-puissant, de nous avoir accordé la force et la dévotion d'accomplir ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Monsieur HAMEL Meziane, MCA à l'UMBB, notre encadreur, pour ses précieux conseils ainsi que ses encouragements illimités.

Nous adressons nos sincères remerciements à Monsieur MANSOUR Mourad, Ingénieur à Electro-Industries d'Azazga, de nous avoir accueilli durant ces 3 mois de stage, pour son temps et sa confiance, en nous affectant des tâches valorisantes.

C'est dans la joie et la bonne humeur que nous avons effectué notre stage. De ce fait, nous tenons à remercier l'ensemble des employés et des ingénieurs d'Electro-Industries, qui ont énormément contribué à notre intégration et à notre apprentissage tout au long de cette expérience.

Nos vifs remerciements vont à Madame ABDESLAME Djamila de nous avoir fait l'honneur de présider le jury de notre soutenance.

Nous remercions aussi, Monsieur AOUZELLAG Haroune, MCB à l'UMBB, et Mademoiselle LARABI Zina, MAA à l'UMBB, pour avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous voulons également remercier toute l'équipe pédagogique de la promotion Master Machines Electriques 2022, qui a contribué à notre formation.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail et à sa rédaction.

Dédicaces

Dédicaces

C'est avec beaucoup d'émotion que je dédie ce mémoire à ma famille.

À la femme la plus importante de ma vie, ma mère, qui n'a cessé de m'épauler tout le long de mon parcours scolaire.

À mon très cher père, qui a toujours trouvé les mots justes pour m'armer de courage et de détermination.

À mes sœurs, Khoulood et Selsabile, et mon frère, Moussa, pour votre soutien inconditionnel. En espérant qu'avec ses quelques paroles pleines d'humilité, avoir exprimé suffisamment ma gratitude envers vous.

Sans oublier mon binôme Boutrik Khaled pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

Abdessalam

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A ma chère mère

A celle qui a souffert, sans me faire souffrir, qu'elle trouve dans ce mémoire le témoignage de ma reconnaissance et mon affection pour tous ses sacrifices.

A mon cher père

A l'homme à qui je dois tout, qu'il trouve ici toute ma reconnaissance et la récompense de tous ses sacrifices.

A mes chères sœurs

A qui je souhaite toute la réussite et beaucoup bonheur.

A Tous ceux qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui sont toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagné durant mes études supérieures, mes aimables amis et collègues d'étude, les familles Boutrik ET Ramdani.

Sans oublier mon binôme Khalfi Abdeslam pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

Khaled

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I Présentation de l'entreprise Electro-Industrie	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Historique de l'entreprise.....	3
I.3. Présentation de l'entreprise.....	3
I.4. Processus de fabrication de moteur asynchrone.....	5
I.5. Les étapes à suivre pour la fabrication de moteur.....	5
I.5.1. Atelier de découpage.....	5
I.5.2. Emballage.....	7
I.5.3. Fabrication des capots de ventilateurs.....	8
I.6. Ateliers de moulage sous pression.....	8
I.7. Ateliers d'usinage.....	9
I.7.1. L'usinage des carcasses.....	9
I.7.2. L'usinage des flasques.....	9
I.7.3. L'usinage des boîtes à bornes.....	9
I.7.4. Fabrication des arbres des rotors (tournage et fraisage).....	9
I.7.5. L'usinage du rotor :.....	10
I.8. Ateliers de bobinage.....	10
I.8.1. Secteur préparation isolation.....	11
I.8.2. Secteur de préparation des bobines.....	11
I.8.3. Secteur bobinage.....	11
I.9. Ateliers de montage.....	13
I.9.1. Secteur équilibrage des rotors et ventilateurs :.....	13
I.9.2. Secteur prémontage :.....	14
I.9.3. Secteur montage final :.....	14

I.10. Contrôle final	15
I.11. Normes.....	16
I.12. Conclusion... ..	16

CHAPITRE II Généralités sur les machines asynchrones et leurs défauts

II.1. Introduction.. ..	17
II.2. Historique.....	17
II.3. Définition de la machine asynchrone.....	18
II.4. Construction de la machine asynchrone	18
II.4.1. Stator.....	19
II.4.2. Rotor.....	20
II.5. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone.....	21
II.6. BILAN DES PUISSANCES.....	24
II.7. Les pertes dans les machines électriques.....	24
II.7.1. Les pertes dans le circuit électrique :	25
II.7.2. Les Pertes dans le circuit magnétique.....	25
II.7.3. Pertes mécaniques.....	27
II.7.4. Les pertes supplémentaires	27
II.8. Avantages et inconvénients	29
II.8.1. Avantages.....	29
II.8.2. Inconvénients... ..	29
II.9. Principaux défauts de la machine asynchrone, causes et conséquences.....	30
II. 9.1. Défauts statoriques :	30
II.9.2. Défauts rotoriques :	32
II.9.3. Les causes de default :	35
II.9.4. Conséquences des défauts statoriques :	35
II.10. Conclusion.. ..	36

CHAPITRE III Modélisation numérique du couplage magnétothermique dans un moteur asynchrone

III.1. Introduction..	37
III.2. Etude des phénomènes électromagnétiques	37
III.2.1. Equations de base	37
III.3. Formulation magnétodynamique	38
III.3.1. Introduction des potentiels	38
III.3.2. Formulation en champ électrique \mathbf{E}	39
III.3.3. Formulation en champ magnétique \mathbf{H}	39
III.3.4. Formulation électrique $\mathbf{A} - \mathbf{V}$	40
III.4. Les équations des machines asynchrones à cage pour différentes régions	41
III.5. Pertes Joules	41
III.6. Phénomènes thermiques	42
III.7. Lois de transfert de chaleur dans une machine électrique	43
III.7.1. Échange de chaleur par conduction	43
III.7.2. Équation de conduction de la chaleur	43
III.7.3. Conductivité des matériaux	44
III.7.4. Échange de chaleur par convection	44
III.7.5. Échange de chaleur par rayonnement	44
III.7.6. Couplage magnétothermique équations couplée	45
III.8. Méthodes de modélisation	45
III.9. Modélisation magnétothermique par la méthode des éléments finis (MEF)	46
III.9.1. La discrétisation	47
III.10. Conclusion	49

CHAPITRE IV Simulation numérique d'un moteur asynchrone de 3kW

IV.1. Introduction	51
IV.2. Présentation de la machine	51

IV.3. Présentation du logiciel Ansys-Motor-CAD	53
IV.4. Géométrie de la machine	53
IV.5. Calcul du bobinage.....	55
IV.6. La courbe de première aimantation	58
IV.7. Courbe des pertes spécifiques de tôle M800-50A2.....	58
IV.8. Le maillage	59
IV.9. Cartographie du champ magnétique.....	60
IV.10. Caractéristiques électromécaniques	61
IV.11. Caractéristiques magnétodynamiques	62
IV.12. Induction dans l'entrefer	64
IV.13. Distribution de température de modèle couplé électromagnéto-thermique à une température ambiante	64
IV.14. Simulations de la machine avec défauts.....	67
IV.14.1. Court-circuit à 6 % :	67
IV.14.2. Court-circuit à 11 %	69
IV.14.3. Court-circuit à 20 %	72
IV.15. Conclusion	74

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1. Logo de l'entreprise Electro-Inductrice	3
Figure I.2. Vue satellitaire du site de l'entreprise	4
Figure I.3. Rouleaux de tôle magnétique	6
Figure I.4. Tôles statoriques et rotoriques	6
Figure I.5. Paquet statoriques	7
Figure I.6. Paquet rotoriques	8
Figure I.7. Capot de ventilateur	8
Figure I.8. Arbre d'un moteur électrique après usinage	10
Figure I.9. Arbre emmanché dans le paquet	10
Figure I.11. Préparation des bobines	11
Figure I.10. Bobineuse de fil électrique	11
Figure I.12. Bobinage automatique d'encoche isolées	12
Figure I.13. Stator avec caniveau	12
Figure I.14. Stator bobiné monté dans une carcasse	14
Figure I.15. Pré montage du stator dans la carcasse	14

Chapitre II

Figure. II. 1 Symbole d'une machine asynchrone triphasé	18
Figure. II. 2 Élément de constitution d'une machine à cage d'écureuil	19
Figure. II. 3 Stator d'une machine asynchrone	20
Figure. II. 4 Rotor bobiné	20
Figure. II. 5 Rotor à cage d'écureuil	21
Figure. II. 6 Création du champ tournant	22
Figure. II. 7 Représentation des champs magnétiques créés par les bobines	23
Figure. II. 8 Bilan des puissances dans un moteur asynchrone	24
Figure. II. 9 Cycle d'hystérésis d'un matériau magnétique	26
Figure. II. 10 Courant de Foucault dans le matériau magnétique	27
Figure. II. 11 Différentes pertes dans une machine asynchrone	29
Figure. II. 12 Représentation des différents défauts statoriques possibles	31
Figure. II. 13 Exemples de défaut de court-circuit statorique d'un MAS	31
Figure. II. 14 Cassures de barres	32
Figure. II. 15 Rupture d'anneaux	33

Figure. II. 16 Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte.....	34
Figure. II. 17 Caractéristiques géométriques d'un roulement	35

Chapitre III

Figure.III. 1. Conductivité thermique en fonction de la température.....	44
Figure.III. 2. Carte des échanges thermiques dans une machine fermée	47
Figure.III. 3. Élément à une dimension	48
Figure.III. 4. Élément triangulaire à deux dimensions	48
Figure.III. 5. Élément carré à deux dimensions / Éléments à trois dimensions	48
Figure.III. 6. Éléments à trois dimensions	49

Chapitre IV

Figure. VI. 1 Moteur asynchrone à cage d'écureuil 3 kW	52
Figure. VI. 2 Interface de logiciel	53
Figure. VI. 3 Géométrie de la machine asynchrone à cage d'écureuil.....	54
Figure. VI. 4 Distribution radiale de bobinage.....	57
Figure. VI. 5 Distribution panoramique du bobinage	57
Figure. VI. 6 Courbe de première aimantation de la tôle magnétique M800-50A.....	58
Figure. VI. 7 Courbe des pertes spécifiques de tôle M800-50A2	59
Figure. VI. 8 Maillage de moteur	60
Figure. VI. 9 L'induction magnétique.....	60
Figure. VI. 10 Courant de phase en fonction de la vitesse.....	61
Figure. VI. 11 Couple du moteur en fonction de la vitesse.....	61
Figure. VI. 12 Courbes des courants de phases en charge	62
Figure. VI. 13 Courbe de variation de couple en fonction de temps.....	63
Figure. VI. 14 Courbe de vitesse de rotation en fonction de temps	63
Figure. VI. 15 Distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer.....	64
Figure. VI. 16 Vue axiale de la distribution de température du moteur de test par Motor-CAD	65
Figure. VI. 17 Vue radiale de la distribution de température du moteur par	65
Figure. VI. 18 . Variation de la température dans les têtes de bobines	66
Figure. VI. 19. Variation de la température dans la carcasse du moteur.....	66

Figure. VI. 20 Vue radiale de la distribution de température du moteur avec un défaut de 6%	67
Figure. VI. 22 Courbe de variation de température dans les têtes de bobines avec défaut de 6%	68
Figure. VI. 23 Courbe de variation de température dans la carcasse avec défaut de 6%	69
Figure. VI. 24 Vue radiale de la distribution de température du moteur avec un défaut de 11%	70
Figure. VI. 25 Vue axiale de la distribution de température du moteur avec un défaut de 11%	70
Figure. VI. 26 Courbe de variation de température dans la carcasse avec défaut de 11%	71
Figure. VI. 27 Courbe de variation de température dans les têtes de bobines avec défaut de 11%	71
Figure. VI. 28 Vue radiale de la distribution de température du moteur avec un défaut de 20%	72
Figure. VI. 29 Vue axiale de la distribution de température du moteur avec un défaut de 20%	72
Figure. VI. 30 Courbe de variation de température dans les têtes de bobines avec défaut de 20%	73
Figure. VI. 31 Courbe de variation de température dans la carcasse avec défaut de 20 %	73

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau VI. 1.Cahier de charges de la machine étudiée	51
Tableau VI. 2.caractéristiques des bobines statoriques.....	56

Liste des symboles

Liste des symboles

I_n : Courant nominale de la machine [A]

\vec{E} : Champ électrique [V/m]

\vec{H} : Champ magnétique [A/m]

P_{supp} : Pertes supplémentaire [w].

P_{tot} : Pertes totales en charge [w].

P_f : Pertes fer [w].

P_{mec} : Pertes mécanique [w].

P_{js} : Pertes Joule statorique [w].

P_{jr} : Pertes Joule rotoriques [w].

\vec{B} : Induction magnétique[T].

p : Nombre de paires de pôles.

R : Résistance du conducteur [Ω].

P_h : pertes par hystérésis [W/Kg]

V : Le volume d'une tôle magnétique [m³].

K_h : coefficient de Steinmetz ($h = 120$ à 380)

K_f : est un coefficient de pertes par courant de Foucault.

f : fréquence [Hz].

B_{max} : induction maximale [T].

U : est la tension composée du réseau [V].

I : est le courant en phase [A].

φ : est le déphasage entre le courant et la tension.

N_s : Vitesse de synchronisme [tr/min].

N_r : Vitesse de rotation du rotor.

I_n : Courant nominale de la machine [A]

σ : Conductivité électrique.

ε : Perméabilité électrique absolue.

ε_0 : Perméabilité électrique à vide.

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide. $4\pi \cdot 10^7$ [H/m]

μ_r : Perméabilité magnétique relative de milieu.

μ : Perméabilité magnétique absolue.

\vec{J}_s : Densité de courant dans les enroulements. [A/m²]

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

A : Charge linéaire [A.m]

λ : conductivité thermique (W/m.°C).

q : production volumique de chaleur (W/m³).

c : capacité thermique massique (J/Kg.°C).

ρ : Résistivité. [Ω .m]

ρ_c : capacité thermique volumique (J/m³ .°C).

T_s : température de surface du solide (°C).

T_∞ : température du fluide à l'infini (°C).

σ : la constante de Stefan-Boltzmann, égale à $5.67032 \cdot 10^{-8}$ W/m²K⁴.

Introduction
générale

Introduction générale

La machine asynchrone occupe une place très importante dans l'industrie et dans le monde des entraînements électriques, ceci est dû à sa simplicité de construction, sa robustesse et son faible coût de fabrication. Mais malgré toutes ces qualités évoquées, cette machine subit des défaillances émanant d'un vieillissement prématuré.

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

De plus, certaines utilisations des moteurs asynchrones ne tolèrent pas les pannes intempestives. Ces pannes peuvent être dues aux défauts qui peuvent être d'origine mécanique (excentricité du rotor) ou électrique (court-circuit du bobinage statorique, rupture de barre ou l'anneau). Ces défauts conduisent dans la majorité des cas à l'augmentation du courant absorbé et donc la température de la machine.

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

Dans ce mémoire, Nous nous intéressons à l'étude par la méthode des éléments finis de l'impact des défauts de type court-circuit sur le comportement thermique d'une machine asynchrone de 3 kW fabriquée par l'entreprise nationale Electro-Industries.

Notre travail est réparti en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons la société Electro-Industries d'Azazga, où nous avons effectué notre stage pratique. Nous décrirons les différents ateliers et les différentes procédures et étapes suivies lors de la fabrication des moteurs asynchrones.

Dans le chapitre deux, nous avons présenté des informations générales sur la construction et le fonctionnement des moteurs asynchrones. Ainsi que les différents types de défauts qui peuvent subvenir dans ces moteurs.

Le chapitre trois traite des équations mathématiques qui permettent de modéliser les phénomènes magnétiques et thermiques dans les moteurs asynchrone.

Le quatrième et dernier chapitre, est divisé en deux parties : La première partie traite des résultats numériques de la simulation électromagnétique d'un moteur à induction de 3 kW. Après, vient la simulation avec défauts de court-circuit entre spires de la même phase et la détermination de la distribution de la température dans les différentes zones du moteur.

CHAPITRE I.

Présentation de l'entreprise

Electro-Industries

I.1. Introduction

Electro-Industries est une société spécialisée dans la conception, la fabrication et la commercialisation d'équipements électriques industriels (transformateurs de distribution, moteurs, générateurs et groupes électrogènes).

Dans ce chapitre, nous présenterons l'entreprise susmentionnée où nous avons effectué nos stages de fin d'études. Nous décrirons les différentes étapes de fabrication d'un moteur à induction et les différents ateliers que traverse le moteur au cours du processus de fabrication.

I.2. Historique de l'entreprise

Electro-industries est issue de la réorganisation du secteur industriel opérée en Algérie entre 1980 et 2000. Ce qui a conduit en 1999 à la restructuration de l'ancienne ENEL (entreprise Nationale des Industries Électrotechniques) en un certain nombre d'EPE/SPA, parmi lesquelles figure Electro-Industries.

L'usine a été construite dans le cadre d'un contrat de produit "clé en main" avec un partenaire allemand, en l'occurrence Siemens responsable du produit et Fritz Werner pour l'ingénierie et la construction d'infrastructures mises en place par des entreprises algériennes.

I.3. Présentation de l'entreprise

L'entreprise Electro-Industrie est d'une superficie de 45 Ha est située sur la route nationale N°12, distante de 30 Km du chef-lieu de la wilaya de Tizi-Ouzou, et à 8 Km de la commune d'Azazga



Figure I.1. Logo de l'entreprise Electro-Inductrice

Electro-Industries est spécialisée dans la fabrication et la commercialisation des moteurs électriques, alternateurs, transformateurs de distributions et groupes électrogènes.

En matière de qualité, Electro-Industrie dispose de ses propres laboratoires d'essais et de mesures, de ses produits ainsi pour le contrôle de principaux matériaux utilisés dans sa fabrication. Les différentes valeurs d'essais et de mesures sont consignées sur des procès-verbaux et des cartes de contrôles.



Figure I.2. Vue satellitaire du site de l'entreprise

Les produits Electro-Industries sont réalisés et contrôlés suivant les normes DIN (Degrés de protection des moteurs électriques), VDE (règlement relatif aux machines électriques) et sont conformes aux recommandations européennes CE et aux normes internes sévères préconisées par le donneur de licence Siemens. Le niveau de leur qualité a été approuvé par la clientèle locale (Sonelgaz, Enmtp, Eniem, Kahrif...etc) et étrangères (Russie, Pays Africains, Le Sénégal, Le Mali... etc).

La capacité de production des transformateurs de cette entreprise couvre les besoins du marché national à 70% environ. Les ventes de moteurs représentent 30% environ de sa capacité de production. Il faut savoir qu'Electro-Industries est le seul fabricant de ces produits en Algérie. L'entreprise a procédé à la mise en place de son système qualité en 2002 et a été certifiée par QMI canada le 24.7.2004, ISO 9001 version 2000.

I.4. Processus de fabrication de moteur asynchrone

Un moteur électrique sert à transformer de l'énergie électrique en énergie mécanique

La plupart des moteurs tournent autour d'un axe ; mais il existe des moteurs spéciaux qui se déplacent de façon linéaire. Tous les moteurs fonctionnent soit en courant alternatif soit en courant continu, mais quelques-uns peuvent fonctionner sur les deux modes.

Les moteurs électriques basses tensions (BT), fabriqués par Electro- Industrie AZAZGA sont du type asynchrone triphasé à une ou à deux vitesses. De plus, ces moteurs électriques sont monophasés à deux condensateurs de démarrages et permanent. Ils sont de construction fermée, à carcasse ventilée, en alliage d'aluminium et en fonte. Les rotors sont en court-circuit à simple et doubles cages d'écureuil, en aluminium pur (99,95%) pour les petites et moyennes puissances et en barres de cuivre et alliage de cuivre pour les grandes puissances.

I.5. Les étapes à suivre pour la fabrication de moteur

La fabrication des moteurs se fait dans 04 ateliers

- Atelier de découpage.
- Atelier d'usinage.
- Atelier de bobinage.
- Atelier de montage

I.5.1. Atelier de découpage

I.5.1.1 Entrée de la matière première (la tôle magnétique)

La tôle magnétique à graines non orientées se présente sous forme de rouleaux isolés au vernis. Il existe plusieurs types de tôles utilisées au niveau de l'usine dont la M530-50A, M800-50A, M800-50HP.



Figure I.3. Rouleaux de tôle magnétique

I.5.1.2 Découpage des feuilles de tôles statoriques et rotoriques

Découpage automatique successif : Cette procédure se fait à l'aide d'une presse rapide qui découpe les feuilles de tôle rotoriques et statoriques avec l'encochement de ces dernières.

Découpage semi-automatique : cette procédure se fait à l'aide d'une machine qui ne fait que découper, ensuite séparer les tôles statoriques des tôles rotoriques.

Découpage semi-automatique par outils à encocher : Pour les moteurs de 70 à 220 mm de hauteur d'axe, on utilise le découpage automatique successif à l'aide d'une presse rapide où sa vitesse peut aller jusqu'à 300 coups/min. Ce procédé permet de découper les tôles statoriques et rotoriques finis à la fois.

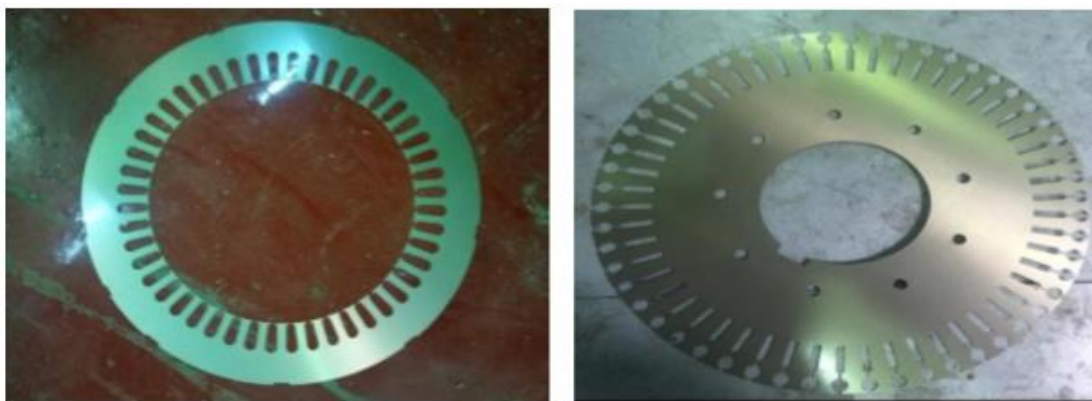


Figure I.4. Tôles statoriques et rotoriques

I.5.2. Empaquetage

I.5.2.1 L'empaquetage des paquets statoriques

Il s'effectue après l'empilage des tôles selon le nombre et la longueur du paquet bien déterminés. L'opérateur les place dans un outil monté sur presse à empaqueter pour l'obtention de la longueur demandée suivant les plans. Ensuite, il faut les maintenir avec des agrafes placées dans les rainures pressées à l'aide de quatre vérins.



Figure I.5. Paquet statoriques

I.5.2.2 L'empaquetage des paquets rotoriques

L'empilage des tôles se fait grâce à un opérateur sur un calibre de triage pour obtenir la hauteur du paquet rotorique demandée. Une fois que la hauteur est obtenue l'arbre est placée sur la partie supérieure de la machine via un piston pour qu'il soit emmanché avec pression dans le paquet rotorique (petits moteurs).

L'empilage des tôles rotoriques des grands moteurs se fait de la même manière sauf qu'elles sont maintenues avec des rivets.



Figure I.6. Paquet rotoriques

I.5.3. Fabrication des capots de ventilateurs

A partir des tôles sous forme de disques en acier, on procède à l'emboutissage par l'emboutisseuse. Pour la partie plane, celle-ci sera percée sous forme de grille par un poinçon matrice pour permettre l'évacuation (l'échappement) de la chaleur lors du fonctionnement du moteur.



Figure I.7. Capot de ventilateur

I.6. Ateliers de moulage sous pression

Dans cet atelier, sont fabriquées toutes les pièces rentrant dans la fabrication des moteurs en version aluminium tel que :

Injection du rotor en aluminium pur à 99.5 %

Réalisation des pièces en alliage d'aluminium pur par (Silicium, Manganèse, Cuivre) comme carcasse, flasque (AS, BS), boîtes à bornes, couvercles de boîte à bornes.

I.7. Ateliers d'usinage

Cet atelier comporte des machines qui réalisent les opérations d'usinage comme le tournage, fraisage..., suivant des plans.

I.7.1. L'usinage des carcasses

Il faut procéder à l'alésage et au dressage jusqu'à atteindre les côtes près des carcasses sur un tour vertical pour les grands moteurs. Pour les petits moteurs cette étape est faite sur un tour parallèle.

I.7.2. L'usinage des flasques

Les flasques subissent l'opération de tournage des bords de centrage et du logement de roulement et de sa profondeur.

I.7.3. L'usinage des boîtes à bornes

Perçage et taraudage des trous de fixation recevant le couvercle à l'aide d'une perceuse à broches.

I.7.4. Fabrication des arbres des rotors (tournage et fraisage)

Les arbres sont en acier, ils sont ramenés sous forme de ronds, ensuite l'opérateur les découpe à l'aide d'une scie mécanique à la longueur donnée suivant la gamme d'usinage.

Centrage et de dressage : les barres découpées sont dirigées vers la machine à tour parallèle qui fait la mise en longueur, le perçage des trous de centrage et de taraudage.

Le tournage : vient ensuite le tournage, il se fait grâce à un tour à copier qui fonctionne grâce à un Palper qui se déplace sur un Gabarit.

Le fraisage : le tournage fini, vient le tour du fraisage des logements de clavettes qui se fait à l'aide des fraises verticales.



Figure I.8. Arbre d'un moteur électrique après usinage

I.7.5. L'usinage du rotor

- Le tournage du paquet à l'aide d'un tour parallèle, fin que l'entrefer soit parfait.
- La rectification des sièges des roulements et les sorties d'arbre.

Le fraisage des rainures de clavette coté entraînement



Figure I.9. Arbre emmanché dans le paquet

I.8. Ateliers de bobinage

L'atelier de bobinage se divise en trois secteurs :

- Secteur de préparation de l'isolation.
- Secteur de préparation des bobines.
- Secteur bobinage.

I.8.1. Secteur préparation isolation

C'est dans ce secteur que sont préparés tous les isolants pour toutes les machines soit

- Caniveaux d'encoches
- Cale de fermeture
- Gaines isolantes
- Séparateur de phases.
- Lame intermédiaire.
- Câbles de raccordement.

Les isolants utilisés par l'Electro-Industries garantissent une qualité conforme aux normes internationales.

I.8.2. Secteur de préparation des bobines



Figure I.11. Bobineuse de fil électrique



Figure I.10. Préparation des bobines

La confection des bobines se fait à l'aide des gabarits montés sur les machines rotatives (bobineuses) qui sont réglées selon le nombre de spires par faisceaux.

I.8.3. Secteur bobinage

C'est le secteur où se déroule le processus de fabrication du stator bobiné allant de l'insertion des caniveaux d'encoches jusqu'à l'imprégnation.

I.8.3.1 Insertion des caniveaux d'encoches

Cette opération se à l'aide d'une machine qui découpe le papier isolant et le pénètre automatiquement dans les encoches du stator.

I.8.3.2 Insertion des bobines dans le stator

L'insertion se fait soit :

Automatiquement pour les moteurs à hauteurs d'axe 70 mm à 130 mm

Manuellement pour les moteurs à hauteurs d'axe 132 mm à 400 mm

C'est lors cette opération que l'on intègre aussi les lames intermédiaires pour le bobinage à double couches ainsi que les cales de fermeture.

Une fois les bobines introduites, on place les séparateurs de phases pour éviter le court-circuit entre phases. Par la suite, on procède au formage de têtes de bobines manuellement avec un mandrin et un maillet pour respecter l'homogénéité et les dimensions des têtes de bobines coté AS (coté entraînement) et BS (coté ventilation).



Figure I.13. Stator avec caniveau



Figure I.12. Bobinage automatique d'encoche isolées

Connexion

Les bobines de chaque phase sont liées entre elles de manière précise en conformité avec le schéma de bobinage afin d'obtenir trois grandes bobines, chacune

I.8.3.3 Connexion des bobines et câbles de raccordement

Les entrées et les sorties de chaque phase connectées et soudées à des câbles de raccordement qui assurent la liaison électrique avec la boîte à bornes. L'entrée et la sortie de

chaque phase, sont différenciées des autres par des couleurs, Phase U : orange ; Phase V : noir et Phase W : rouge.

I.8.3.4 Frettage et pressage des têtes de bobines

Après raccordement des câbles, le stator subit un frettage à la main à l'aide d'un fil isolant. Une fois fretté, le stator passe à la presse hydraulique afin d'administrer la forme et les dimensions définitives des têtes de bobines coté AS et BS.

I.8.3.5 Contrôle

Contrôle visuel de séparateur de phases et des têtes de bobines par rapport au diamètre extérieur et intérieur du paquet statorique.

- Contrôle électrique
- La mesure de la résistance Ohmique entre phases.
- Vérification s'il n'y a pas de court-circuit entre spires, court-circuit entre phases et de court-circuit à la masse à haute tension (2000 V).

Contrôle de polarité des trois phases en cas d'anomalie en vue de localiser les trois entrées et les trois sorties (U1, V1, W1 et U2, V2, W2).

- Le contrôle de frettage des têtes de bobines.
- La vérification des caniveaux d'encoches, coupure de phase et les réglettes de fermeture.

I.8.3.6 Imprégnation

Cette opération consiste à mettre de la résine au bobinage du stator pour le rendre plus compact, deux imprégnations sont utilisées

- Imprégnation de goutte à goutte.
- Imprégnation dans un bain de résine.

I.9. Ateliers de montage

On recense deux secteurs essentiels dans cet atelier.

I.9.1. Secteur équilibrage des rotors et ventilateurs :

Il a pour objectif d'assurer une rotation parfaite du rotor et de compenser les balourds pouvant provenir de :

- Manque d'homogénéité de la matière
- Défaut d'usinage
- Malformation des barres de cuivre

I.9.2. Secteur prémontage

Les opérations réalisées dans ce secteur sont :

- Huiler l'intérieur de la carcasse pour faciliter l'insertion du paquet statorique.
- Mise en longueur et tournage des bords de centrage de la carcasse, côté AS et BS.
- Fraisage des pattes pour atteindre la hauteur d'axe voulu.
- Emmanchement forcé du stator bobiné à l'intérieur de la carcasse.

I.9.3. Secteur montage final

C'est là où le moteur arrive à sa forme finale cela après :

- Montage des roulements sur l'arbre à l'aide d'une presse
- L'emmanchement des flasques paliers coté AS et BS aussi clavette ventilateur.
- Montage du ventilateur et les circlips.
- Fixation du capot de ventilateur.
- Fixation de la boîte à borne et ses câbles de raccordement.

De cette manière on peut dire que notre moteur est complètement monté et qu'il est prêt à être acheminé vers la plateforme d'essai pour le contrôler.



Figure I.15. Pré montage du stator dans la carcasse



Figure I.14. Stator bobiné monté dans une carcasse

I.10. Contrôle final

Une fois le montage finit, le moteur sera remis aux plates-formes d'essais pour subir les différentes opérations de contrôle.

- On a deux types de contrôles :
- Contrôle électrique (contrôle du bobinage).
- Contrôle mécanique (c'est le contrôle au niveau des différents ateliers, usinage mécanique et montage).

Les moteurs se dirigent directement à la plateforme pour les contrôler et détecter les différents défauts électriques ou mécaniques.

Le contrôle série se fait selon un plan de contrôle et un tableau d'essai série. Les étapes à suivre pour faire un contrôle électrique sont :

- Le contrôle visuel : C'est le contrôle de la carcasse du moteur, il doit vérifier le bon serrage des boulons, ainsi les connexions sur la boîte à borne.
- Essai en court-circuit : Le court-circuit sert à contrôler le rotor, afin de vérifier s'il fonctionne normalement (blocage du rotor), en lui injectant le courant nominal (I_n) qui est sur la plaque signalétique du moteur. Ensuite on relève la tension du court-circuit (V_{cc}) ainsi que la puissance du court-circuit (P_{cc}).
- Essai à vide : L'injection de la tension nominale (U_n) qui est sur la plaque signalétique ensuite relever les valeurs du courant à vide (I_0) et la puissance à vide (P_0).
- Le sens de rotation : La bonne rotation du moteur est à droite quand on le met sous tension et c'est au contrôleur de vérifier cela. ((Quand on met le moteur sous tension, la bonne rotation de celui-ci se fait par la droite. C'est une mission qui incombe au contrôleur.))
- Appréciation du bruit : cette étape est effectuée par un contrôleur, qui doit être attentif au bruit du moteur à l'aide d'un stéthoscope. L'objectif est de surveiller si le bruit est inhabituel et/ou anormal. Si c'est le cas, le souci est signalé et le moteur est révisé.

I.11. Normes

Les moteurs sont conformes aux normes suivantes :

- CEI 34-1 : Machines électriques tournantes- Caractéristiques assignées et de fonctionnement.
- CEI 34-2 : Méthodes pour la détermination des pertes et du rendement.
- CEI 34-5 : Classification des degrés de protection (code IP).
- CEI 34-6 : Modes de refroidissement (code IC).
- CEI 34-7 : Classification des formes de construction et des dispositions de montage (code IM).
- CEI 34-8 : Marques d'extrémité et sens de rotation.
- CEI 34-9 : limites de bruit.
- CEI 34-11 : protection thermique incorporée.
- CEI 34-12 : Caractéristiques de démarrage des moteurs à induction à cage, à une seule vitesse, pour des tensions d'alimentation inférieures ou égales à 690 V – 50Hz.
- CEI 72 : Dimensions et séries de puissance des machines électriques tournantes.
- VDE 0530 : Règlements relatifs aux machines électriques tournantes.

I.12. Conclusion

Le stage effectué au sein de l'entreprise Electro-Industries nous a permis de mettre en évidence l'aspect pratique de l'ensemble des connaissances théoriques sur le moteur asynchrone. Nous avons observé de nombreuses procédures et processus de fabrication pour ce moteur, comme les différents ateliers . En effet, chaque atelier possède des étapes primordiales pour la fabrication du moteur, de sa matière première jusqu'au montage final.

CHAPITRE II.

Généralités sur les machines asynchrones et leurs défauts

II.1. Introduction

La machine asynchrone est une machine électrique à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. En effet, deux structures existent pour cette dernière : le rotor bobiné et le rotor à cage d'écureuil. Le cas du rotor à cage est moins onéreux et présente une meilleure robustesse d'un point de vue mécanique.

Les circuits magnétiques du rotor et du stator sont constitués d'un empilage de fines tôles métalliques pour éviter la circulation de courant de Foucault.

On retrouve aujourd'hui la machine asynchrone dans de nombreuses applications, notamment dans l'industrie (machines-outils), dans l'électroménager. À l'origine, elle était uniquement utilisée en moteur. Cependant, grâce à l'électronique de puissance, elle est de plus régulièrement utilisée en génératrice [1].

II.2. Historique

Historiquement le dix-neuvième siècle fût l'époque des grandes découvertes en Electrotechnique, dont les bases fondamentales ont été établies (1820-1830) par des hommes de science comme, Oersted, Ampère, Biot, Savart, Laplace, Ohm, Faraday. Ultérieurement en (1873), Maxwell formalisa les lois de l'électromagnétisme moderne dans son fameux ouvrage ;"Treatise on Electricité and Magnétisme". Seulement, ce n'est qu'à partir de (1870) que l'électrotechnique industrielle s'affirma, particulièrement en raison de la production d'énergie électrique par les génératrices à courant continu (dynamos) de Gramme et de Siemens. Par la suite, dans les années (1880), furent conçus les alternateurs et les transformateurs polyphasés. Les premiers devaient concurrencer et évincer les dynamos pour la production de l'électricité. Enfin, les travaux du yougoslave TESLA et de l'italien FERRARIS complétèrent les systèmes à courants alternatifs polyphasés par la génération et la construction des machines d'induction ou asynchrones en (1888) [2].

En 1889, Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski, deux électriciens allemands d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil qui sera construit industriellement à partir de 1891 [33].

II.3. Définition de 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 [3].

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 [2] :

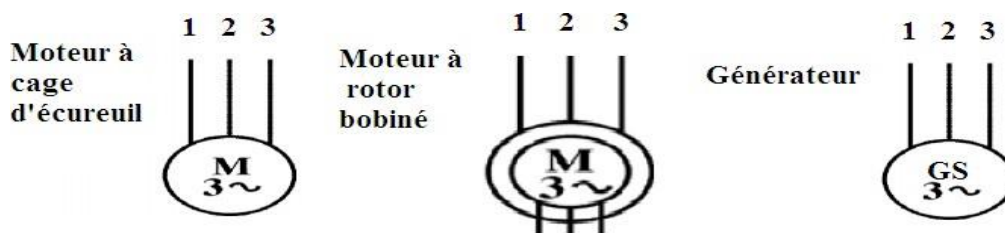


Figure. II. 1 Symbole d'une machine asynchrone triphasé

II.4. 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.

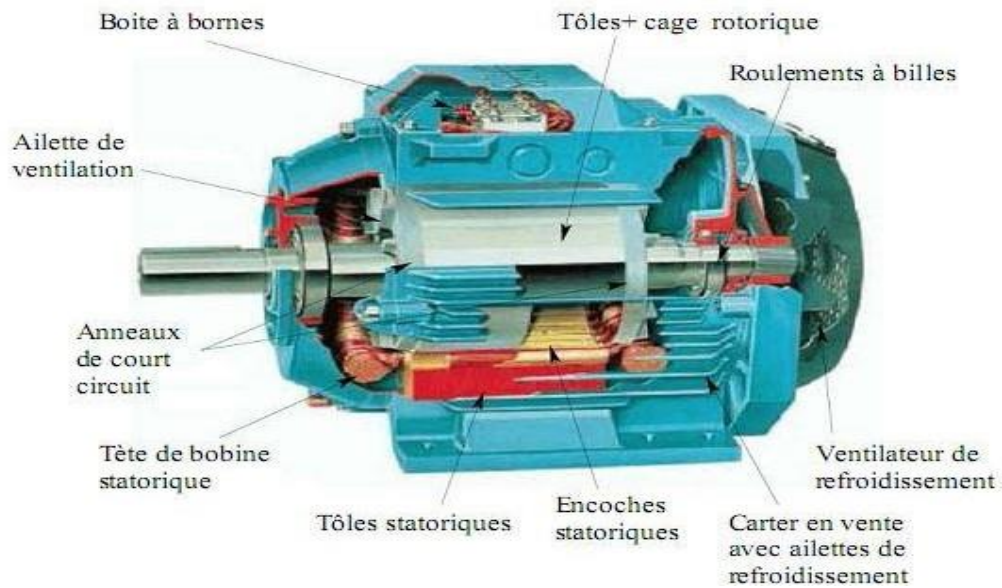


Figure. II. 2 Eléments de constitution d'une machine a cage d'écureuil

II.4.1. 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 statorique 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].

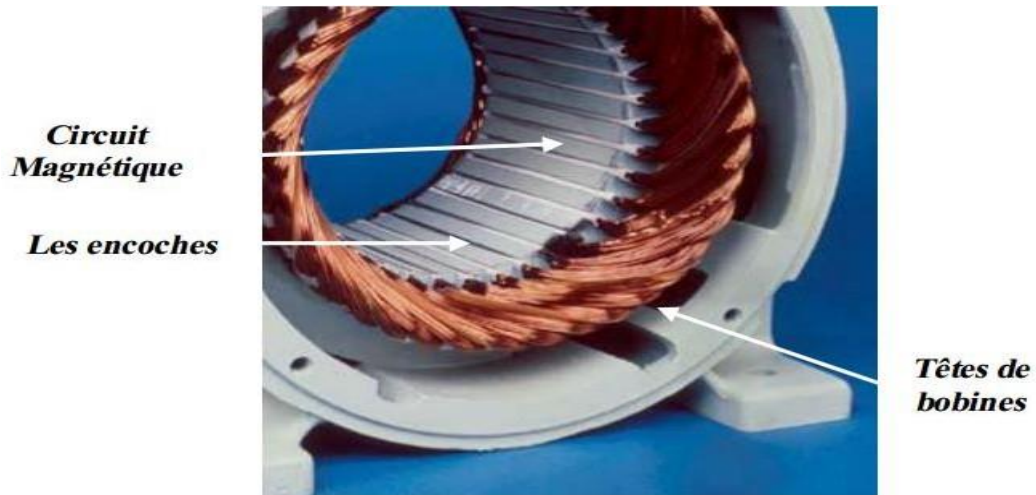


Figure. I. 3 Stator d'une machine asynchrone

II.4.2. 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 :

II.4.2.1 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].

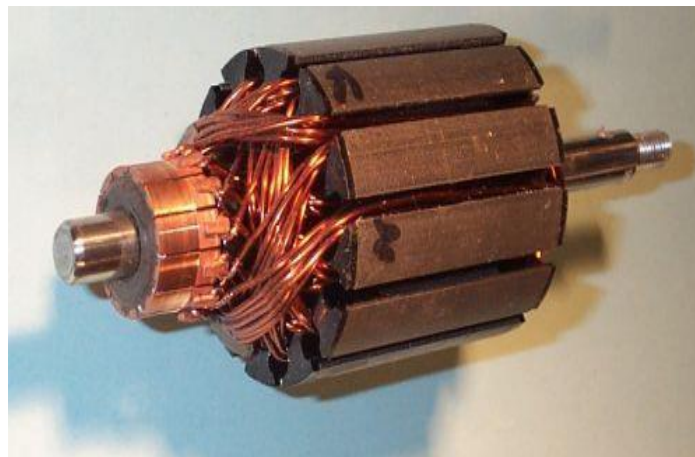


Figure. II. 4 Rotor bobiné

II.4.2.2 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. II. 5 Rotor à cage d'écureuil

II.5. 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 (en tr/min).

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

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 rotorique 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 statorique et rotorique 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.

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \quad (\text{II.2})$$

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

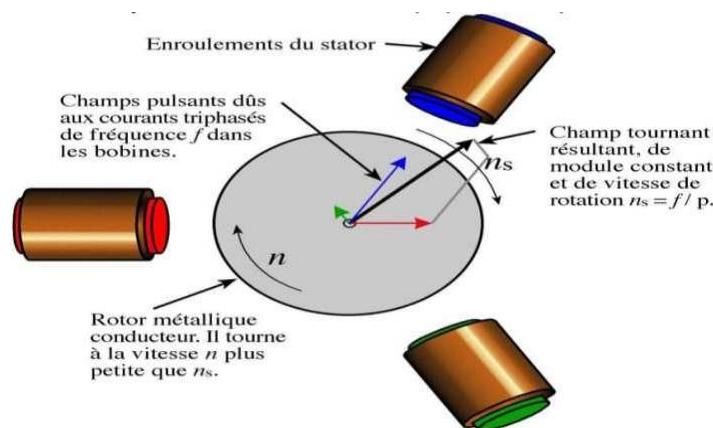


Figure. II. 6 Création du champ tournant

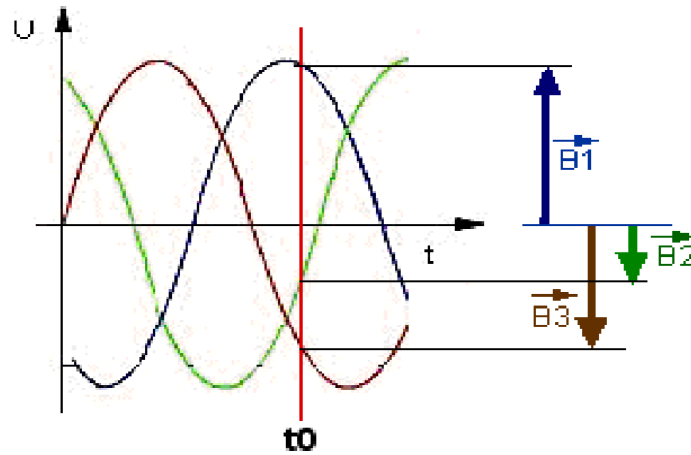


Figure.II. 7 Représentation des champs magnétiques créés par les bobines

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 :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} \quad (\text{II.3})$$

Ω_s : Vitesse de rotation du champ tournant.

ω : Pulsation des courants alternatifs.

P : Pulsation des courants alternatifs.

II.6. Bilan des puissances

Le moteur asynchrone reçoit une puissance à partir du réseau, une puissance qu'on appelle puissance absorbée (Pa). Celle-ci puissance se calcule par la relation suivante :

$$Pa = \sqrt{3} * U * I * \cos\varphi \tag{II.4}$$

Avec :

U : est la tension composée du réseau

I : est le courant en phase

φ : est le déphasage entre le courant et la tension

Suite à l'absorption de cette puissance, une partie d'elle se perd au stator sous forme de chaleur (pertes joules) et par hystérésis (pertes fer statorique).

Après cette perte, la puissance restante sera transmise au stator, on l'appelle la puissance électromagnétique (Pem)

L'utilisation de la puissance électromagnétique par le rotor causera des pertes rotorique (Pfr) et des pertes joule rotorique (Pjr) et produira une puissance (Pem).

Sur l'arbre du moteur, on trouvera la puissance utile fournie par le rotor (Pu) inférieur à la puissance mécanique à cause des pertes mécaniques [15].

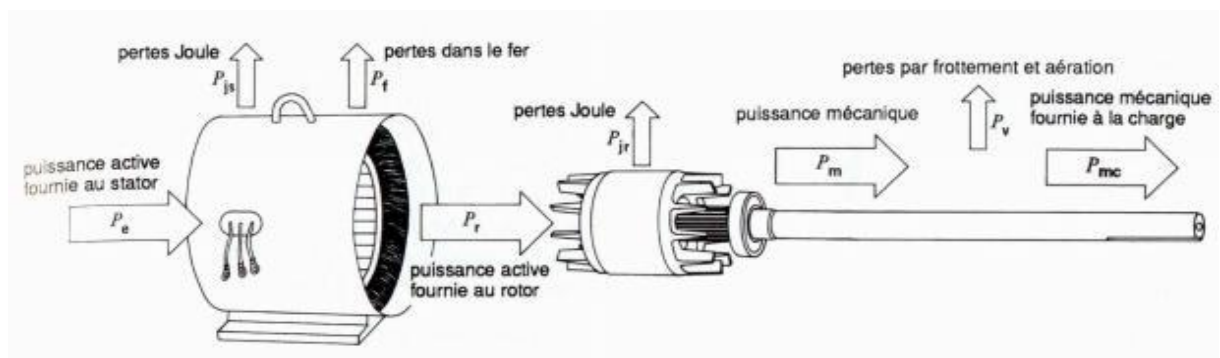


Figure. II. 8 Bilan des puissances dans un moteur asynchrone

II.7. Les pertes dans les machines électriques

Elles sont multiples d'origines différentes. Ces dernières peuvent être regroupées en quatre grandes catégories :

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

Dans ce qui suit, nous allons définir toutes les pertes dans le moteur asynchrone à cage.

II.7.1. Les pertes dans le circuit électrique

Ce sont les pertes par effet joule induites dans les parties conductrices de la machine parcourues par des courants. Ces pertes sont localisées dans les enroulements d'excitation du stator, et dans la cage d'écureuil du rotor [10].

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

$$P_j = RI^2 \quad (\text{II.5})$$

Avec :

R : Résistance du conducteur [Ω].

I : courant traversant le conducteur [A].

II.7.2. Les Pertes dans le circuit magnétique

Elles sont appelées aussi pertes dans le fer, étant donné que les matériaux utilisés par ce circuit sont, généralement à base de fer. Elles représentent l'énergie consommée en raison de la présence du champ magnétique variable dans le circuit magnétique. Ces pertes ne résultant que de la tension d'alimentation U et la fréquence f . Pour une fréquence constante, on peut les considérer comme proportionnelles au carré de la tension d'alimentation, indépendantes des courants. Elles représentent une part élevée des pertes totale car elles sont présentes dès lors que le moteur est sous tension. Leur minimisation requiert une bonne connaissance des mécanismes physiques à l'origine de la magnétisation du matériau et de la dissipation d'énergie associée.

Les pertes fer sont le résultat de deux phénomènes physiques : les pertes par hystérésis et les pertes par courant de Foucault [11].

matériaux magnétiques ont une résistivité non nulle). Ces pertes sont dissipées sous forme de chaleur [13].

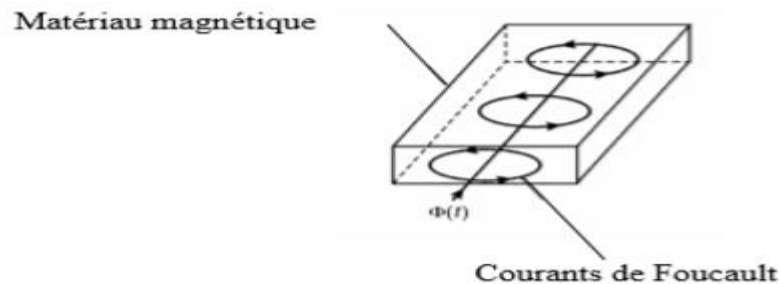


Figure. II. 10 Courant de Foucault dans le matériau magnétique

II.7.3. Pertes mécaniques

Ces pertes prennent en compte tous les frottements dus à la rotation de la partie mobile de la machine. Ces pertes dans les paliers lubrifiés ont fait l'objet de nombreuses études. Ces études ont pour base l'équation des films minces visqueux qui permettent de tenir compte des conditions géométriques.

II.7.3.1 Les pertes par frottement dans les roulements

Ces pertes sont dues aux contacts des corps roulants, aux mouvements du lubrifiant et du fluide, et des joints intégrés aux roulements. Ces frottements dépendent de nombreux facteurs à savoir : la charge appliquée sur le roulement, type de lubrification (graisse, injection d'huile), viscosité et type de géométrie du roulement [14].

II.7.3.2 Les pertes par ventilation

On appelle pertes par ventilation la puissance absorbée par le ventilateur monté en bout d'arbre de la machine qui est utilisée pour le refroidissement de la machine [14].

II.7.4. Les pertes supplémentaires

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 sont les problèmes les plus aigus dans la caractérisation des pertes du moteur asynchrone. Elles peuvent être déterminés comme la différence entre les pertes totales en charge de la machine et les pertes déterminées par la méthode de séparation des pertes.[26]

$$P_{\text{supp}} = P_{\text{tot}} - (P_f + P_{\text{mec}} + P_{\text{js}} + P_{\text{jr}}) \quad (\text{II.7})$$

Avec :

P_{supp} : Pertes supplémentaire [w] ;

P_{tot} : Pertes totales en charge [w] ;

P_f : Pertes fer [w] ;

P_{mec} : Pertes mécanique [w] ;

P_{js} : Pertes Joule statorique [w] ;

P_{jr} : Pertes Joule rotoriques [w].

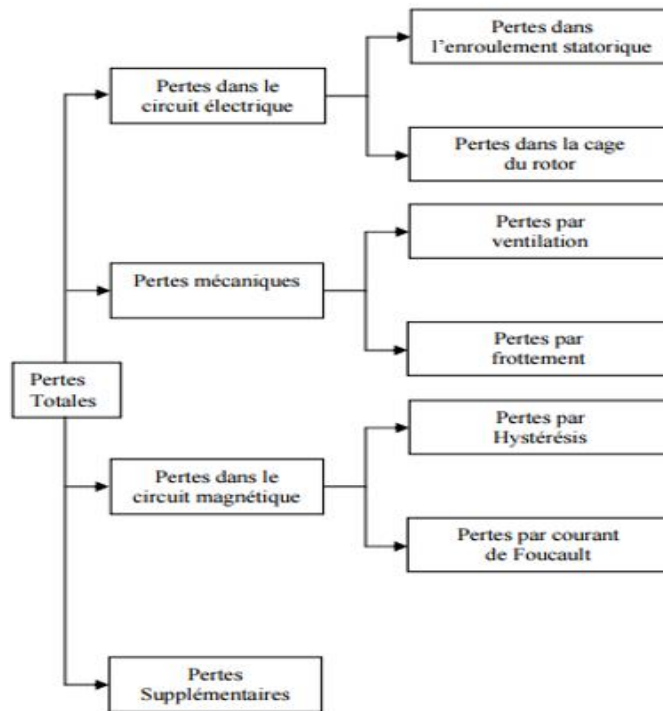


Figure. II. 11 Différentes pertes dans une machine asynchrone

II.8. Avantages et inconvénients

II.8.1. Avantages

- Structure simple.
- Robuste et facile à construire.
- Utilisée dans la puissance moyenne et élevée.
- Reliée directement aux réseaux industriels à tension et fréquence.
- Tourne à une vitesse variable différente de la vitesse synchrone.
- La vitesse de rotation peu variable.
- Elle est utilisée pour la réalisation de la quasi-totalité de l'entraînement à vitesse. [25]

II.8.2. Inconvénients

- Le couple de démarrage est très élevé par rapport au couple nominal.
- La vitesse dépend de la charge.
- La variation de vitesse nécessite un variateur.
- La structure dynamique est fortement non linéaire avec un fort couplage. [25]

II.9. Principaux défauts de la machine asynchrone, causes et conséquences

Si l'on élimine les pannes dues à des causes propres, c'est-à-dire, résultant d'une mauvaise conception (mauvais choix des matériaux), d'une mauvaise fabrication (défauts d'usinage) ou d'un mauvais montage (serrage, désalignement) du moteur, les défaillances usuelles d'une machine asynchrone sont les suivantes :

II.9.1. Défauts statoriques

- Court-circuit entre phases statoriques.
- Court-circuit entre spire d'une même phase.
- Ouverture d'une phase.
- Défauts du circuit magnétique (ruptures de tôles) [16].

II.9.1.1 Court-circuit entre phases statorique

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage. Néanmoins les répercussions seront différentes les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système.

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. Par ailleurs, un court-circuit proche du neutre entre deux phases a des conséquences moins importantes ; il provoque un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de la fusion des conducteurs.

Les courants statoriques sont complètement déséquilibrés et ce déséquilibre dépend de la localisation du défaut. Dans le cas des machines asynchrones, les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux augmentent lors de l'apparition de ce type de défaut. La détection de ce genre de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases [17].

II.9.1.2 Court-circuit entre spire d'une même phase

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut plutôt commun. Un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné peut-être à l'origine de cette défaillance.

Il engendre une hausse 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. Cela engendre une hausse de la température au niveau du bobinage et, par conséquent, une dégradation accélérée des isolants, pouvant ainsi causer, un défaut en chaîne (apparition d'un 2ème court-circuit) [18].

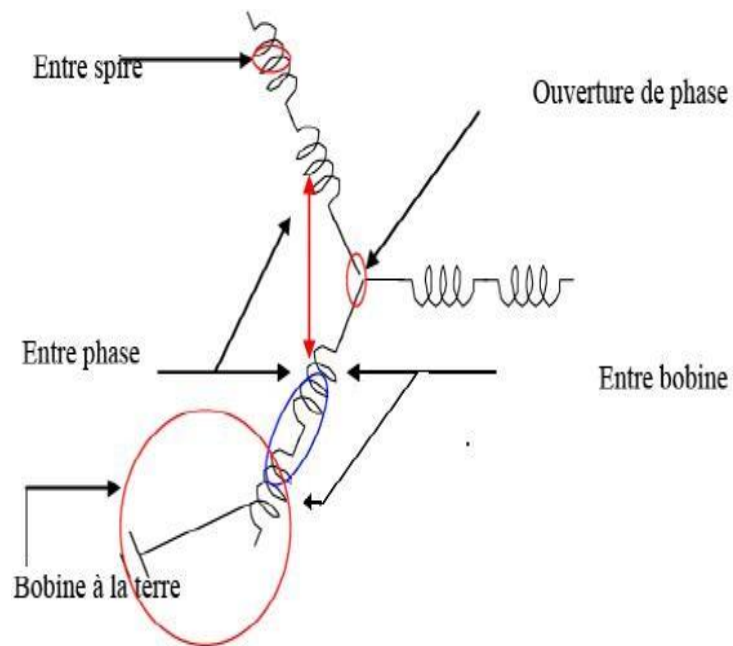


Figure.II. 12 Représentation des différents défauts statoriques possibles



Figure. II. 13 Exemples de défaut de court-circuit statorique d'un MAS

II.9.1.3 Défauts du circuit magnétique

Dans la plupart des cas, ces défauts surviennent à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut intensifier le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'augmentation importante du courant [19].

II.9.2. Défauts rotoriques :

- Cassure de barres.
- Rupture d'anneaux.
- Défauts de roulement.
- Excentricité statique et dynamique.
- Excentricité mixte [16].

II.9.2.1 Cassure de barres

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor.

Il peut se trouver soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. L'usure des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et élargie l'amplitude des oscillations, qui mènent à des oscillations de la vitesse de rotation. Ce phénomène provoque des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations augmente la dégradation de la machine. Donc, 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 [21].



Figure. II. 14 Cassures de barres

II.9.2.2 Rupture d'anneaux

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi souvent que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme il est compliqué de le déceler, ce défaut est habituellement confondu, avec la rupture de barres. Ces portions d'anneaux de court-circuit transportent des courants plus conséquents que ceux des barres rotoriques. Pour cette raison, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent causer leur cassure. La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques. Par conséquent, cela engendre un effet démodulation d'amplitude sur les courants statoriques similaires à celui provoqué à la cassure de barres [22].

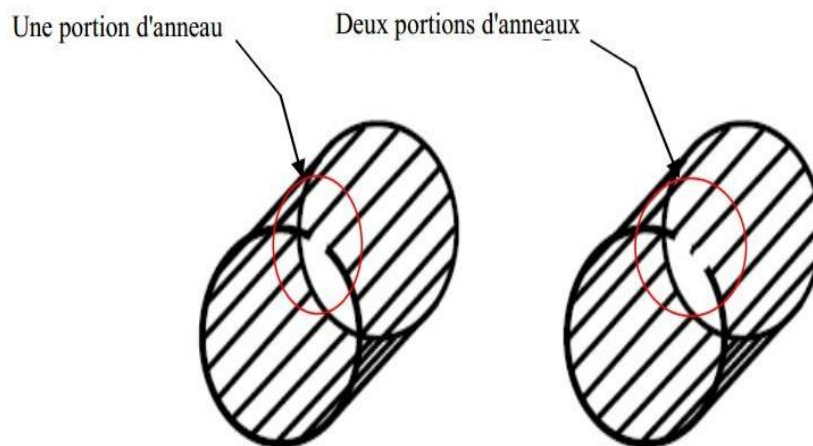


Figure. II. 15 Rupture d'anneaux

II.9.2.3 Défaut d'excentricité

Par moment, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se caractérisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor).

Cet événement est appelé excentricité (statique et dynamique) dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut de roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage).

Trois cas d'excentricité sont, généralement, distingués

- **Excentricité statique** : Le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.

- **Excentricité dynamique** : Le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.
- **L'excentricité mixte** : Il caractérise les 2 cas, précédemment, cités [23].

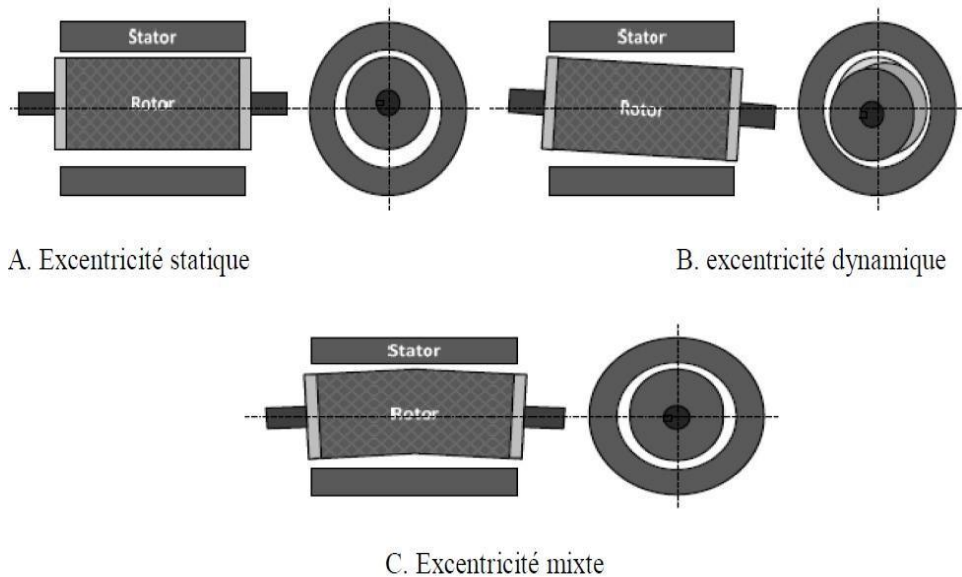


Figure. II. 16 Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte

II.9.2.4 Défauts de roulement

Le roulement à billes a également un vieillissement plutôt rapide, au niveau de l'interface entre le rotor et le stator. Habituellement, ce type de défaut est identifié à partir du spectre d'une mesure acoustique ou vibratoire. En partant du principe que l'entrefer n'est plus constant lors d'une défaillance du roulement. Cette information est récupérée dans le spectre du courant, car n'importe quelle excentricité produira des anomalies dans la distribution du champ dans l'entrefer [24].

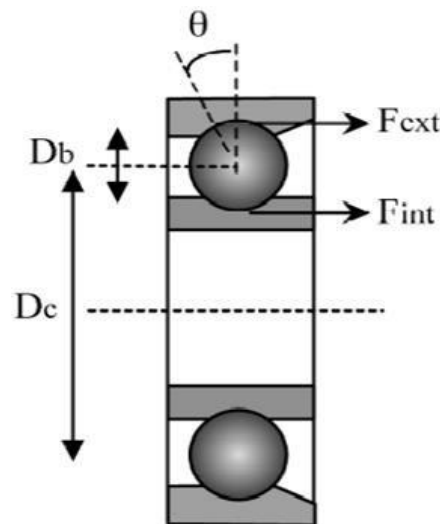


Figure. II. 17 Caractéristiques géométriques d'un roulement

II.9.3. Les causes de défaut :

Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, défauts électriques (court-circuit), sur voltage d'alimentation, soucis d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, etc.

Les amplificateurs des défauts : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement, etc.

Les vices de fabrication et les erreurs humaines : défauts de fabrication composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, etc.

Les machines électriques et les systèmes d'entraînement sont soumis à de nombreux types de défauts. Ces derniers peuvent être classés selon leurs causes en deux grandes familles : les défauts à causes internes et les défauts à causes externes [23].

II.9.4. Conséquences des défauts statoriques

Ordinairement, l'effet d'un court-circuit est de perturber la répartition spatiale du champ tournant. Par ailleurs, cela conduit à des oscillations du couple électromagnétique, donc de la vitesse. Il en résulte des vibrations mécaniques qui, si elles sont fortes, peuvent avoir des effets destructeurs pour les organes mécaniques environnant la machine. D'autre

part, le courant circulant dans la boucle créée par le court-circuit peut atteindre des valeurs élevées et augmenter considérablement la température de la machine [20].

II.10. Conclusion

Dans l'industrie, les moteurs asynchrones triphasés sont énormément utilisés du fait de ses avantages considérables. Au cours de ce chapitre, nous avons présenté le moteur asynchrone, sa constitution, son principe de fonctionnement ainsi que les principaux défauts qui peuvent l'affecter.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter la modélisation numérique des phénomènes magnétiques et thermiques dans les moteurs asynchrones.

**CHAPITRE III. Modélisation
numérique du couplage
magnétothermique dans un moteur
asynchrone**

III.1. Introduction

Au-delà de l'expérimentation constamment nécessaire, le développement des conceptions de moteurs s'appuie sur des modèles capables de prédire le fonctionnement du prototype en cours de conception. Afin de mettre en œuvre ces modèles, il est important de passer par l'analyse des équations aux dérivées partielles. Cela permet de décrire des phénomènes physiques, et donc de connaître les distributions spatiales et temporelles du champ électromagnétique et de la chaleur.

Ces équations sont généralement non linéaires, couplées et évolutives, et leur résolution nécessite l'emploi de méthodes numériques. La modélisation magnétothermique des machines électriques fût à l'origine entièrement réalisée avec des méthodes analytiques, donnant simplement des grandeurs globales avec énormément de conjectures simplificatrices. La méthode des éléments finis a connu une croissance importante parce qu'elle est mieux adaptée aux problèmes non linéaires, à géométrie complexe. Le développement de l'outil informatique est également une des raisons qui l'ont projetée au-devant de la modélisation. La performance de cette méthode réside dans la précision des résultats [26].

Dans ce chapitre, nous présentons les principes de la modélisation numérique des phénomènes magnétothermiques dans les machines électriques.

III.2. Etude des phénomènes électromagnétiques

III.2.1. 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

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

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

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

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 :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0 \quad (\text{III.9})$$

III.3. Formulations magnétodynamiques

III.3.1. Introduction des potentiels

La résolution des équations de Maxwell peut être obtenue en considérant les champs comme inconnues. Toutefois, on préfère souvent exprimer les champs électriques et magnétiques en fonction de potentiels. En effet, M. Feliachi a montré que le système obtenu en prenant comme inconnues les champs (\vec{E}, \vec{H}) convergent moins bien que si on travaille avec des potentiels.

Les potentiels électromagnétiques peuvent être introduits lorsque le rotationnel ou la divergence d'un champ électromagnétique est nul. Ainsi en électrostatique, le rotationnel nul du champ électrique ($\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = 0$) introduit un champ de gradient : $\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}V}$ où V est le potentiel scalaire électrique défini à une constante près. En magnétodynamique, la divergence du champ magnétique ($\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$), introduit-elle un champ rotationnel : $\vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A}$ où \vec{A} est le potentiel vecteur magnétique [27]

III.3.2. Formulation en champ électrique \vec{E}

Cette formulation est obtenue en dérivant par rapport au temps l'équation d'Ampère Maxwell et en faisant l'hypothèse que la perméabilité est invariante par rapport au temps (cas des matériaux linéaires), la formulation s'écrit :

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{E} \right) + \sigma \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) = 0$$

(III.10)

Elle nécessite l'emploi des éléments d'arêtes pour prendre en compte les conditions aux limites (de façon naturelle) et les discontinuités sur les composantes normales aux interfaces des champs de vecteurs [27].

III.3.3. Formulation en champ magnétique \vec{H}

En combinant les relations (III.2) et (III.7), nous obtenons l'équation à résoudre

:

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\sigma} \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{H} \right) + \sigma \left(\frac{\partial \mu \vec{H}}{\partial t} \right) = 0 \quad (\text{III.11})$$

Cette équation associée à des conditions aux limites adéquates admet une solution unique. Toutefois, il faut assurer la continuité de la composante normale de l'induction magnétique, soit en termes de :

$$(\mu_1 \vec{H}_1 - \mu_2 \vec{H}_2) \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{III.12})$$

Cette relation implique la discontinuité de la composante normale de \vec{H} dans le cas de discontinuité de μ . Ceci rend la formulation beaucoup moins intéressante dans le cas des éléments finis nodaux. En revanche, elle est bien adaptée aux éléments d'arêtes puisque la continuité de la composante tangentielle de H est vérifiée [28]

III.3.4. 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 [27]

En reprenant l'équation (III.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 :

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \quad (\text{III.13})$$

De même en remplaçant (III.17) dans (III.2) on obtient :

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (\text{III.14})$$

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

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\vec{\nabla} V \rightarrow \vec{E} = -\vec{\nabla} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{III.15})$$

La combinaison des équations (III.19) et (III.7) nous donne :

$$\vec{J} = \sigma \left(-\vec{\nabla} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \quad (\text{III.16})$$

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

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) + \sigma \left(\vec{\nabla} V + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (\text{III.17})$$

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

III.4. Les équations des machines asynchrones à cage pour différentes régions

- **Au niveau feuille statoriques**

$$\vec{\nabla} \times \left[\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right] + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (\text{III.19})$$

- **Au niveau d'encoches statoriques**

$$\vec{\nabla} \times \left[\frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right] = \vec{J}_{\text{ext}} \quad (\text{III.20})$$

- **Au niveau d'entrefer**

$$\vec{\nabla} \times \left[\frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right] = 0 \quad (\text{III.21})$$

- **Au niveau feuille rotoriques**

$$\vec{\nabla} \times \left[\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right] + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (\text{III.22})$$

- **Au niveau des barres rotoriques**

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

III.5. Pertes Joules

Dans un matériau conducteur, on s'intéresse au calcul des pertes joules dans le volume à chauffer. L'expression de ces pertes est donnée par :

$$P = \iiint_V \vec{E} \cdot \vec{J} dV \quad (\text{III.24})$$

La densité du courant J développée dans un matériau conducteur peut être exprimée en termes du potentiel vecteur comme suit :

$$J = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (\text{III.25})$$

La relation (III.24) et (III.25)

$$P = \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} \right)^2 \quad (\text{III.26})$$

Équations (III.26), est une expression générale qui donne la densité des pertes à tout instant de l'évolution du phénomène électromagnétique peu importe leur régime de variation du courant [26].

Où :

A_m : est amplitude du potentiel vecteur A.

En dérivant (III.27) par rapport du temps t et l'introduisant dans (III.26), nous obtenons :

$$P = \sigma \omega^2 A_m^2 \cos^2(\omega t) \quad (\text{III.28})$$

Bien que les pertes temps, leurs effets totaux sur les phénomènes thermiques sont équivalents aux pertes moyennes sur une période, car les constantes de temps thermiques sont plus grandes que les constantes de temps électriques. Les pertes sont alors données par la relation :

$$P = \sigma \omega^2 \frac{A A^*}{2} \quad (\text{III.29})$$

Où :

A^* est la valeur complexe conjuguée de A.

III.6. Phénomènes thermiques

La non-linéarité de l'équation aux dérivées partielles est due aux propriétés physiques (chaleur spécifique, conductivité thermique) dépendent de la température. Ces événements thermiques sont couplés à l'électromagnétisme par l'intermédiaire d'une source de chaleur constituée d'énergie électromagnétique.

La température est une grandeur physique scalaire qui mesure le degré de chauffage d'un objet ou d'un milieu. Elle mesure également l'agitation thermique microscopique d'une substance [29].

III.7. Lois de transfert de chaleur dans une machine électrique

III.7.1. 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.

$$\vec{q} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (\text{III.30})$$

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 [30]

III.7.2. Équation de conduction de la chaleur

L'étude du comportement thermique des dispositifs électromagnétique 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 : [31]

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = q + \text{div}(\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T) \quad (\text{III.31})$$

Avec :

C capacité thermique massique (J/Kg. °C),

ρ masse volumique (Kg/m³),

λ conductivité thermique (W/m.°C),

ρc capacité thermique volumique ($J/m^3 \cdot ^\circ C$),

q production volumique de chaleur (W/m^3).

III.7.3. 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.[31]

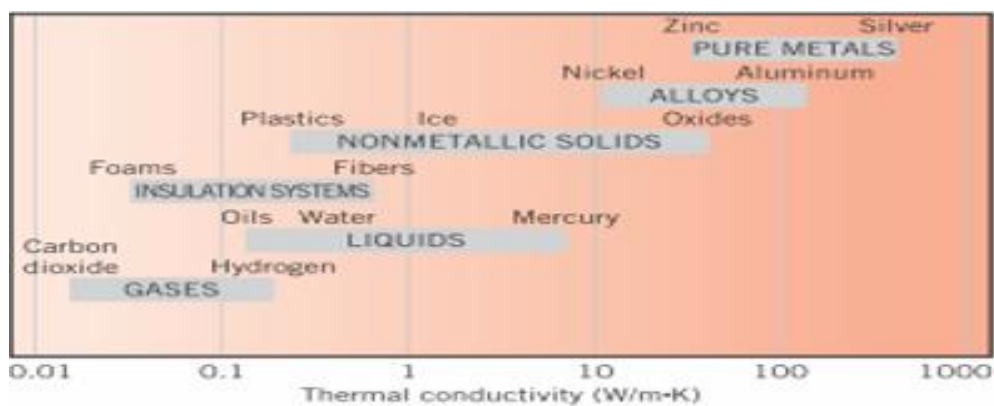


Figure. III. 1. Conductivité thermique en fonction de la température

III.7.4. 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 ϕ [W/m^2] à la différence de température entre les deux milieux par la relation : [31]

$$\phi = h (\theta_s - \theta_m) \quad (III.32)$$

h est le coefficient de convection ou d'échanges en $W/m^2 \cdot ^\circ C$.

III.7.5. 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.

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

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (\text{III.33})$$

Avec :

σ : la constante de Stefan-Boltzmann, égale à $5.67032 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

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 [30]

III.7.6. Couplage magnétothermique et équations couplée

Ces deux phénomènes physiques (thermique et électromagnétique) 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 magnéto-caloriques composé d'équations électromagnétiques et d'équations thermiques, qui s'écrit comme suit : [26]

$$\begin{cases} P = \sigma \omega^2 \frac{AA^*}{2} \\ \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = q + \text{div}(\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T) \end{cases} \quad (\text{III.34})$$

III.8. Méthodes de modélisation

Les outils de modélisation thermique des machines électriques reposent sur deux approches : analytique ou numérique. L'avantage capital de l'approche analytique est que le temps de calcul est relativement court et peut-être intégré dans une approche systématique.

Néanmoins, énormément d'efforts doivent être fournis par les développeurs de modèles, afin de stimuler au mieux les modèles électromagnétiques ainsi que le transfert de chaleur dans les machines. Il faut savoir que les géométries complexes sont compliquées à gérer. D'autre part, les méthodes numériques offrent la possibilité d'étudier de telles géométries et d'ouvrir des informations locales sur les paramètres électromagnétiques et thermiques de chaque point de la machine. Ces méthodes permettent également de se coupler à divers problèmes physiques, tels que des problèmes magnéto mécaniques ou magnétocaloriques. Ces méthodes restent toutefois, onéreuses en temps de calcul et en création de modèles. Deux types d'analyse numérique existent pour traiter les problèmes magnétocaloriques :

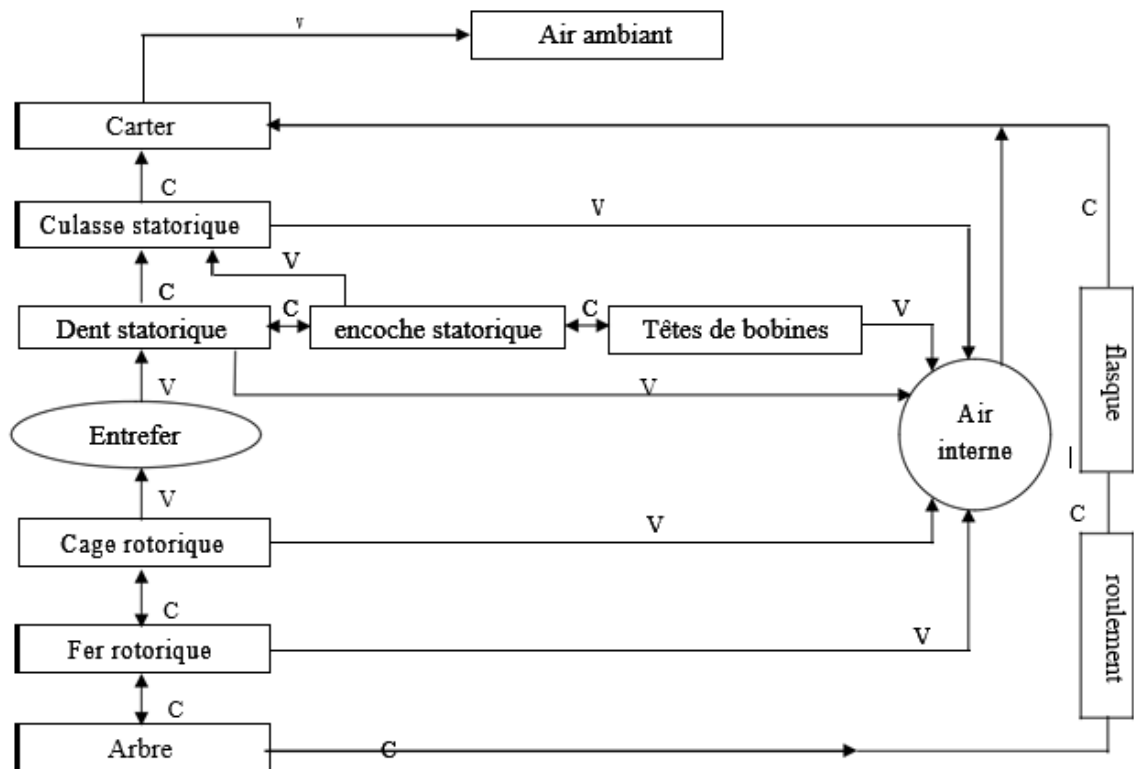
Computational Fluid Dynamics (CFD : Computational Fluid Dynamics) et méthodes des éléments finis (ou FEA : Finité Elément Analysis). Les méthodes d'éléments finis peuvent simuler le transfert de chaleur dans les régions solides des machines, plus particulièrement dans les régions hétérogènes. Pour la zone de contact fluide-solide, des corrélations analytiques et empiriques des coefficients de convection (tableau III.1) ont été utilisées [32].

III.9. Modélisation magnétothermique par la méthode des éléments finis (MEF)

Cette approche est souvent utilisée pour la modélisation électromagnétique. Cependant, certains logiciels réalisant ce type de modélisation incorporent des modules thermiques.

Comparée aux autres méthodes analytiques, l'utilisation de la méthode des éléments finis comporte un avantage majeur. En effet, la distribution de température locale dans les différentes zones de la machine peut être déterminée avec grande précision ; plus particulièrement dans les encoches où les gradients de température peuvent être importants.

Cette méthode permet aussi de définir la conductivité équivalente des enroulements. Dans ce cas, il est plus avantageux d'utiliser la méthode MEF car elle engendre une meilleure répartition des pertes donc une meilleure estimation de la température [26].



C : conduction V : convection

Figure. III. 2. Carte des échanges thermiques dans une machine fermée

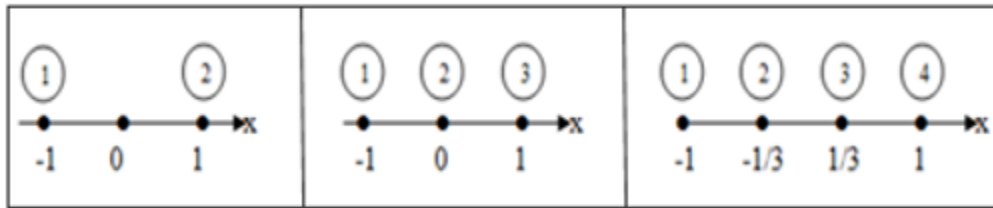
III.9.1. La discrétisation

La formulation intégrale suivie de la discrétisation du domaine, nous permet de faire la somme des valeurs obtenues ; la formulation intégrale de l'E.D. P sur chaque élément du domaine, et la discrétisation du domaine suivit d'une approximation de l'inconnu sur chaque élément de celui-ci nous donnent un ensemble de valeurs. On peut alors dire qu'on est passé d'une intégrale à une somme numérique qui ne peut être qu'une écriture matricielle.

Pour un domaine de recherche à une, deux ou trois dimensions, les éléments classiques peuvent être définis en fonction du degré de courbe d'interpolation qui leur est associé. Un élément qui satisfait généralement linéaire, quadratique ou cubique [29].

Nous présentons dans ce qui suit quelques éléments :

- **Eléments à une dimension**

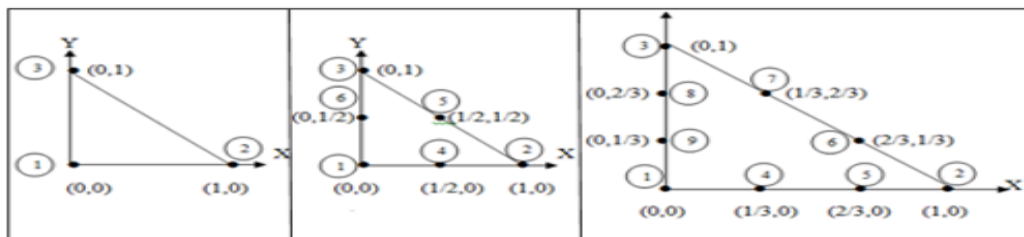


- Linéaire (2 nœuds) - Quadratique (3 nœuds) - Cubique (4 nœuds)

Figure. III. 3.Elément à une dimension

- **Eléments à deux dimensions**

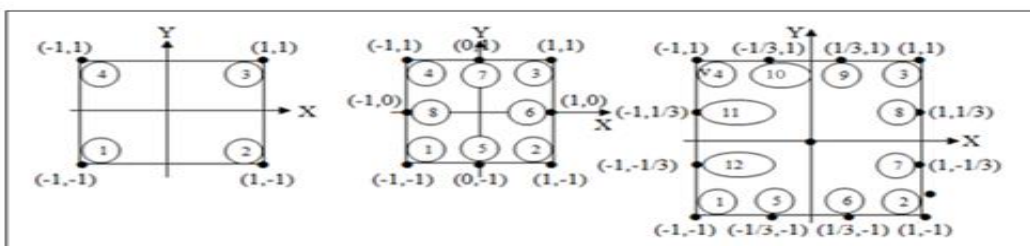
- Eléments triangulaires



- Linéaire (3 nœuds) - Quadratique (6 nœuds) - Cubique (9 nœuds)

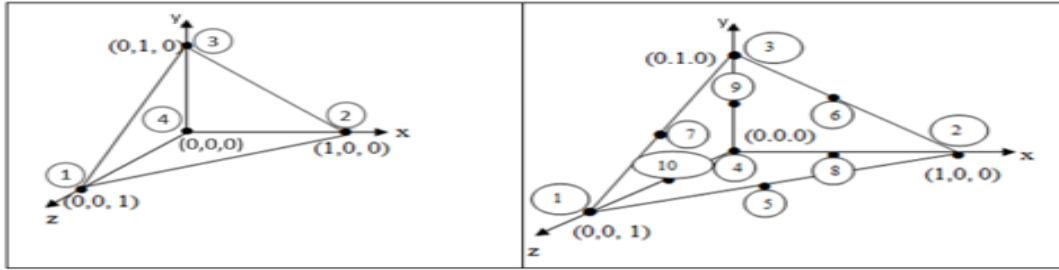
Figure. III. 4.Elément triangulaire à deux dimensions

- Eléments carrés



- Linéaire (4 nœuds) - Quadratique (8 nœuds) - Cubique (12 nœuds)

Figure. III. 5.Elément carré à deux dimensions éléments à trois dimensions



- Linéaire (4 nœuds)

- Quadratique (10 nœuds)

Figure. III. 6.Éléments à trois dimensions

III.10. Conclusion

Ce chapitre était consacré à la modélisation des phénomènes magnétothermiques dans les machines asynchrones. Nous avons évoqué un aperçu de la modélisation électromagnétique, suivi de la modélisation thermique, et conclu par la présentation de la méthode des éléments finis pour la résolution numérique au point des deux phénomènes.

CHAPITRE IV.

Simulation numérique d'un moteur asynchrone de 3kW

IV.1. Introduction

Dans le domaine de la modélisation des machines électriques, la méthode des éléments finis demeure l'outil incontournable pour la résolution des équations différentielles qui gouvernent la distribution du champ magnétique et la température dans les machines.

Dans ce qui suit nous allons utiliser le logiciel Motor-Cad pour la simulation numérique du comportement magnétothermique d'un moteur asynchrone de 3 kW et ce, en régime sain et en présence de défauts.

IV.2. Présentation de la machine

Le moteur étudié est un moteur asynchrone tétrapolaire de 3 kW tétrapolaires, fabriqué par la société Electro-Industries d'Azazga. Les paramètres géométriques et physiques de la machine sont donnés par le tableau (IV. 1).

Paramètres	Symbole	Valeur	Unité
Puissance nominale	P_N	3	kW
Courant nominale	I_N	7	A
Tension nominale	U_N	400	U
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 VI. 1.Cahier de charges de la machine étudiée.



Le coté travail



le coté ventilation



Le rotor



Le stator placée dans la carcasse



Moteur monté

Figure. VI. 1 Moteur asynchrone à cage d'écureuil 3 kW

IV.3. Présentation du logiciel Ansys-Motor-CAD

Motor-CAD a été développé pour donner au concepteur de moteurs une méthode rapide de conception et d'analyse des moteurs électriques. Ce faisant, non seulement la solution de conception optimale peut être identifiée rapidement, mais l'utilisateur comprend parfaitement quelles variables de conception (géométrie, matériaux, etc.) qui ont le plus d'influence sur les performances et le refroidissement de la machine. Les dernières techniques d'interface utilisateur sont adoptées afin de faciliter l'utilisation progiciel et pour que l'utilisateur ne soit jamais à plus d'un clic de souris de l'information requise. Il faut savoir que Motor-CAD a été écrit pour que l'utilisateur n'ait plus besoin d'être expérimenté en électromagnétisme ou en transfert de chaleur. En effet, les paramètres les plus compliqués sont calculés automatiquement par Motor-CAD.

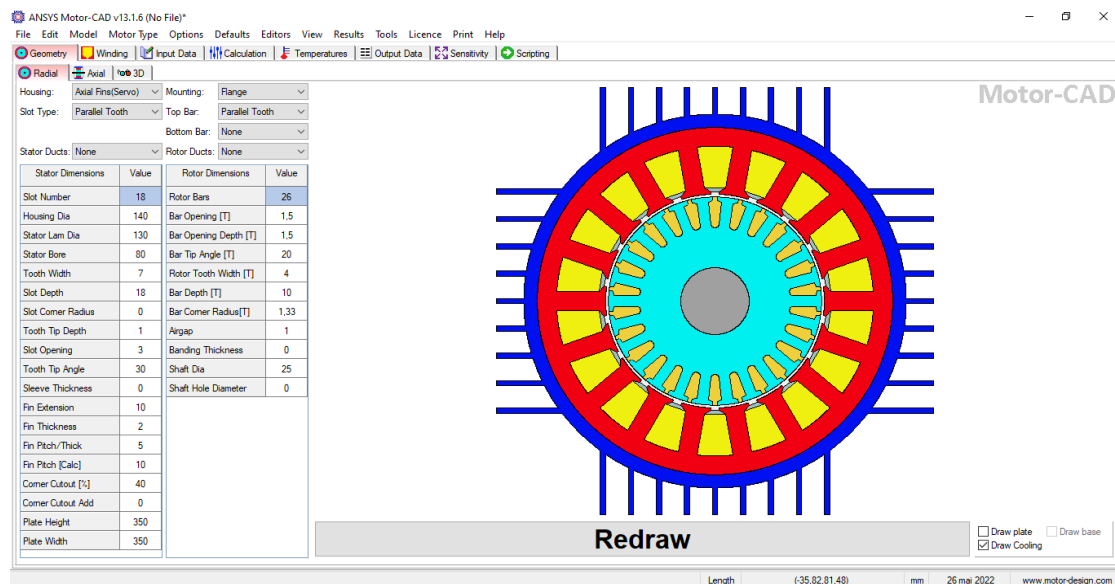


Figure. VI. 2 Interface de logiciel

IV.4. Géométrie de la machine

La figure (IV.3) représente la géométrie de notre moteur dans l'environnement AnsysMotor-CAD. Après avoir mis en place la géométrie, les matériaux et les enroulements, la prochaine étape est la simulation électromagnétique et thermique du moteur.

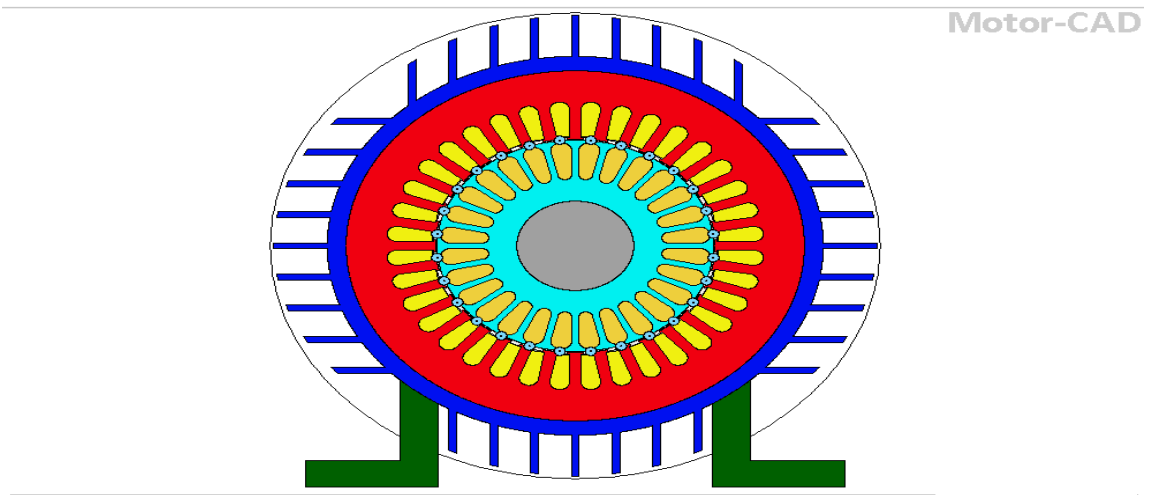


Figure IV. 3. a. Géométrie radiale de moteur asynchrone à cage d'écureuil selon Ansys Motor-CAD

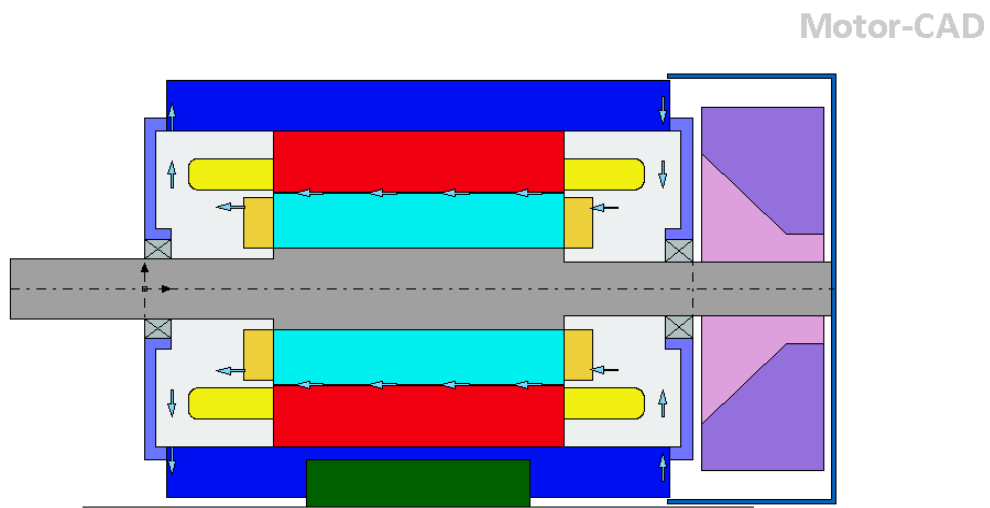


Figure IV. 3. b. Géométrie axiale de moteur asynchrone à cage d'écureuil selon Ansys Motor-CAD

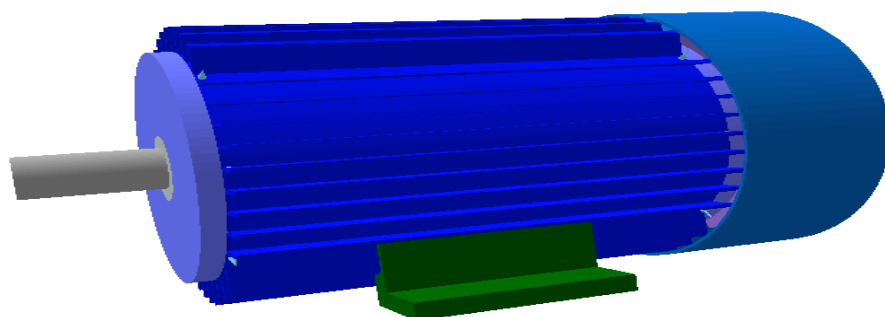


Figure IV. 3. c. Vue en 3D de machine

Figure. VI. 3 Géométrie de la machine asynchrone à cage d'écureuil

IV.5. Calcul du bobinage

L'enroulement du moteur est concentré 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 :

- Nombre d'encoches par pôle par phase :

$$q = \frac{Z}{2pm} \quad (\text{IV.1})$$

- Le pas polaire τ

$$\tau_1 = \frac{Z}{2p} \quad (\text{VI.2})$$

+ Facteur de bobinage

Le facteur de bobinage statorique devient :

$$K_{en} = K_d * K_r * K_i \quad (\text{VI.3})$$

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

+ Facteur de distribution

$$K_d = \frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{q \times \sin\left(\frac{\alpha}{2 \times q}\right)} \quad (\text{IV.4})$$

α : zone de phase

$$\alpha = q \times \gamma \quad (\text{IV.5})$$

γ : Angle électrique entre deux phases

$$\gamma = \frac{p \times 36}{z} \quad (\text{IV.6})$$

+ Coefficient de raccourcissement

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

$$K_r = \sin\left(\frac{\beta \times \pi}{2}\right) \quad (\text{IV.7})$$

Avec :

β : rapport de raccourcissement

$$\beta = \frac{y}{\tau_1} \quad (\text{IV.8})$$

y : pas d'enroulement

$$y = \frac{z}{2p} - \varepsilon \quad (\text{VI.9})$$

ε_1 : raccourcissement. $\varepsilon_1 = 5$

Caractéristique	Valeur
Nombre d'encoches par pole et par phase	3
Le pas polaire	9
Facteur de bobinage Ken	0.998
Zone de phase α	60°
Pas d'enroulement y	9

Tableau VI. 2. caractéristiques des bobines statoriques.

Les paramètres trouvés ont été utilisés pour la conception de notre enroulement sur le logiciel. La figure (IV.4) et la figure (IV.5) représentent la distribution panoramique et radiale de l'enroulement :

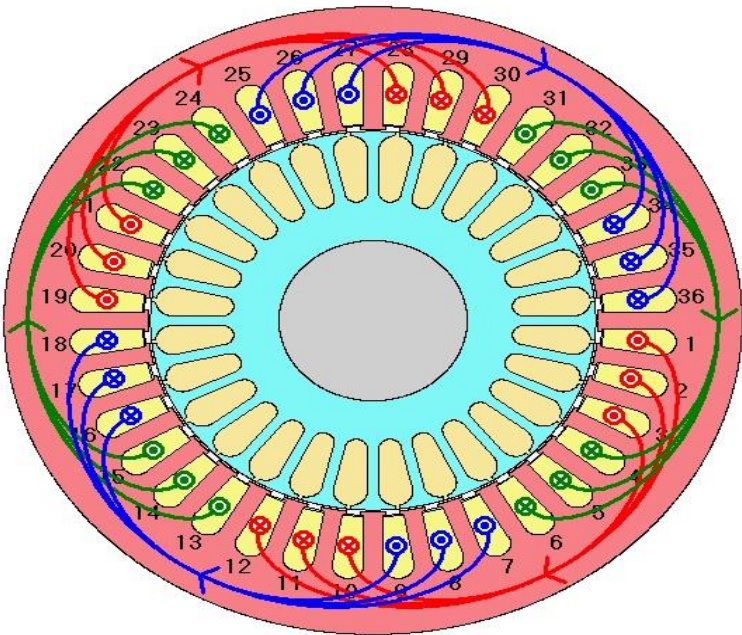


Figure. VI. 4 Distribution radiale de bobinage

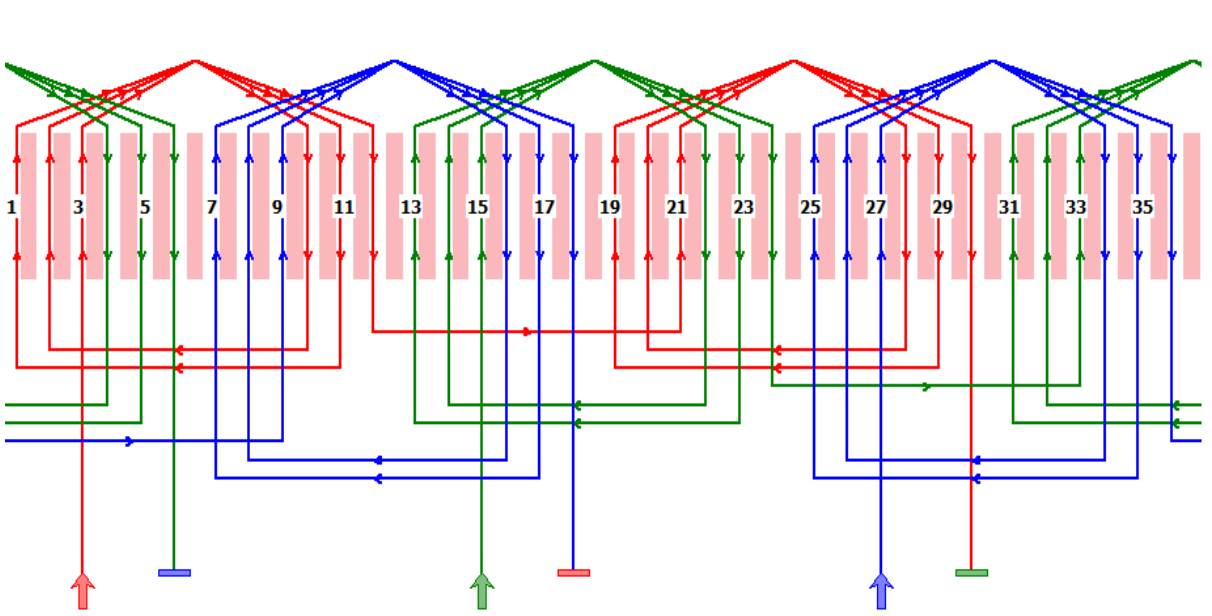


Figure. VI. 5 Distribution panoramique du bobinage

IV.6. La courbe de première aimantation

La courbe de première d'aimantation est obtenue en saisissant les valeurs expérimentales de B et de H. La courbe B-H est la courbe caractéristique des propriétés magnétiques d'un matériau. Elle indique comment le matériau réagit à un champ magnétique externe. On peut observer que l'application d'un champ magnétique en croissance régulière provoque l'apparition d'une induction magnétique B(H) jusqu'à une valeur maximale correspondant à l'état de saturation.

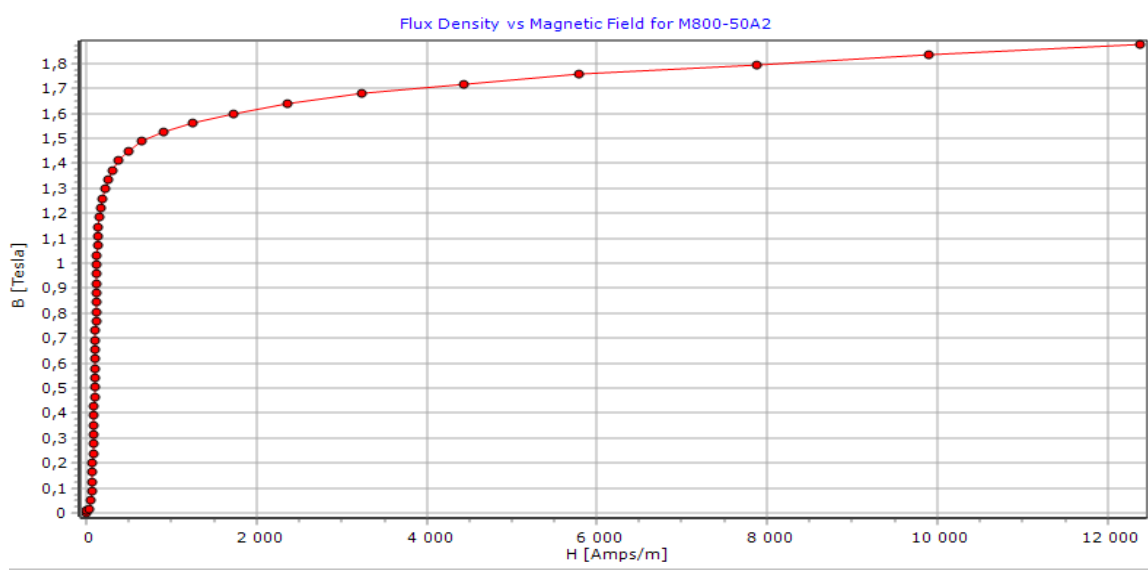


Figure. VI. 6 Courbe de première aimantation de la tôle magnétique M800-50A

IV.7. Courbe des pertes spécifiques de tôle M800-50A2

La courbe de la figure (IV.7) est en forme de parabole, ce qui signifie que les pertes spécifiques à fréquence fixe sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique.

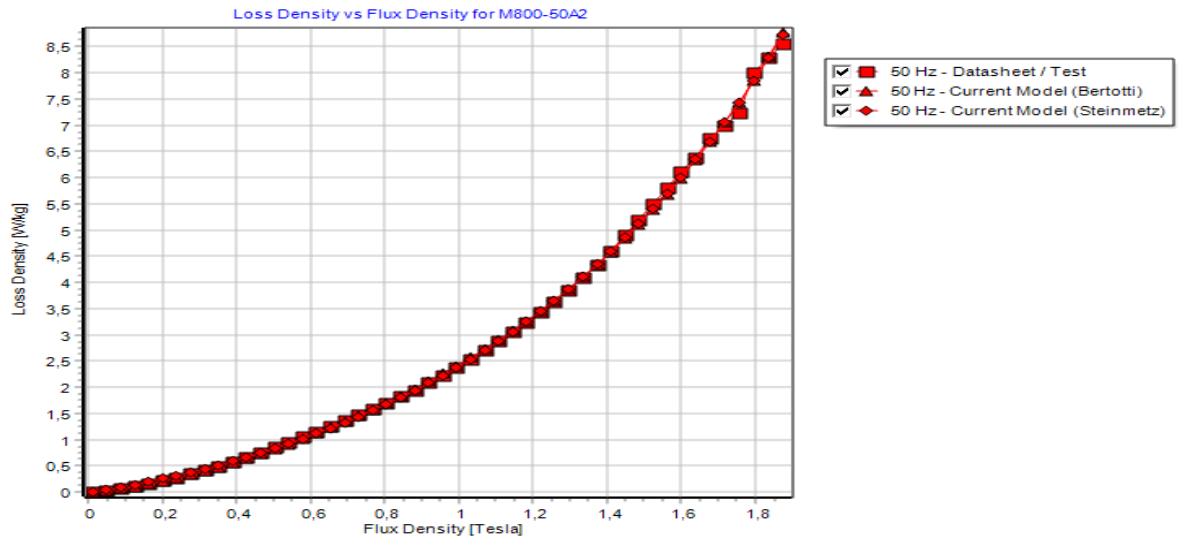
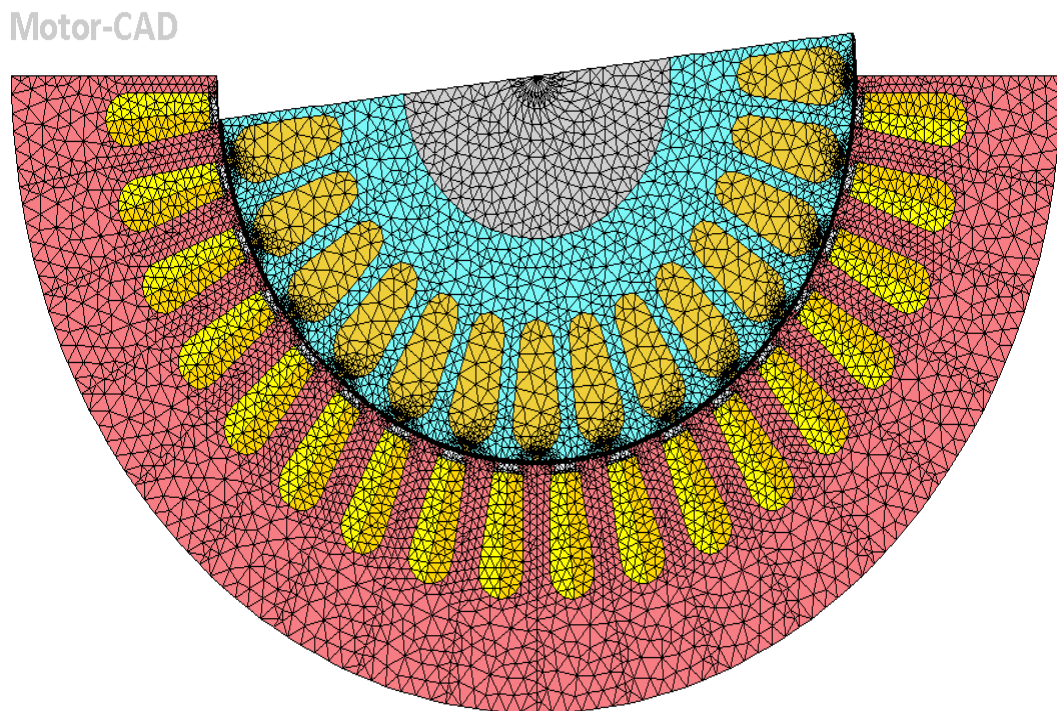


Figure. VI. 7 Courbe des pertes spécifiques de tôle M800-50A2

IV.8. Le maillage

La figure (IV.8) ci-dessous représente le maillage par éléments finis du moteur. Ce dernier est plus fin et concentré au niveau de l'entrefer, des dents statoriques, des barres du rotor et sur les zones très près de l'entrefer.



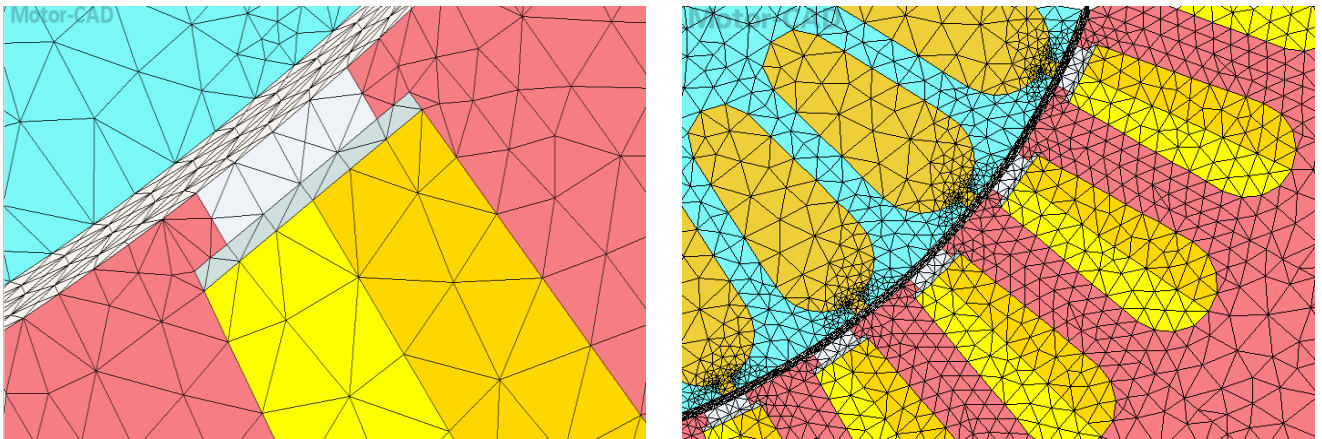


Figure. VI. 8 Maillage de moteur

IV.9. Cartographie du champ magnétique

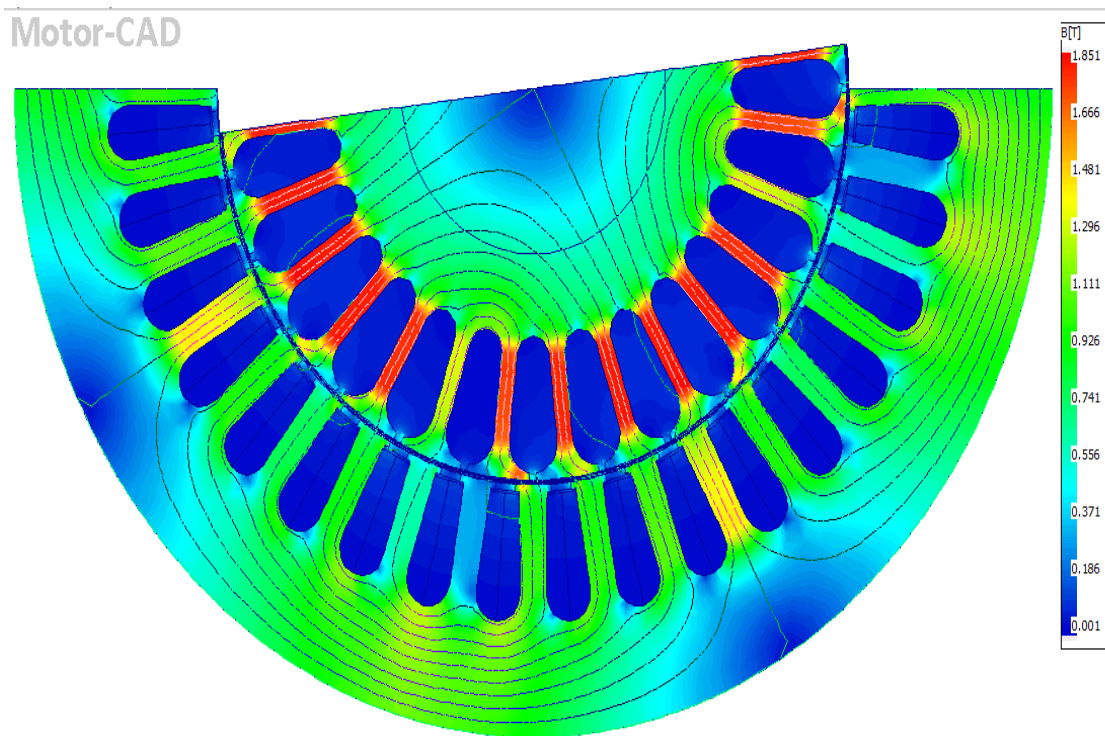


Figure. VI. 9 L'induction magnétique

La cartographie d'induction montre que la machine est tétrapolaire. Les valeurs d'induction concordent bien avec les valeurs injectées dans la première courbe d'aimantation.

IV.10. Caractéristiques électromécaniques

Les figures (IV.10) et (IV.11) 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.

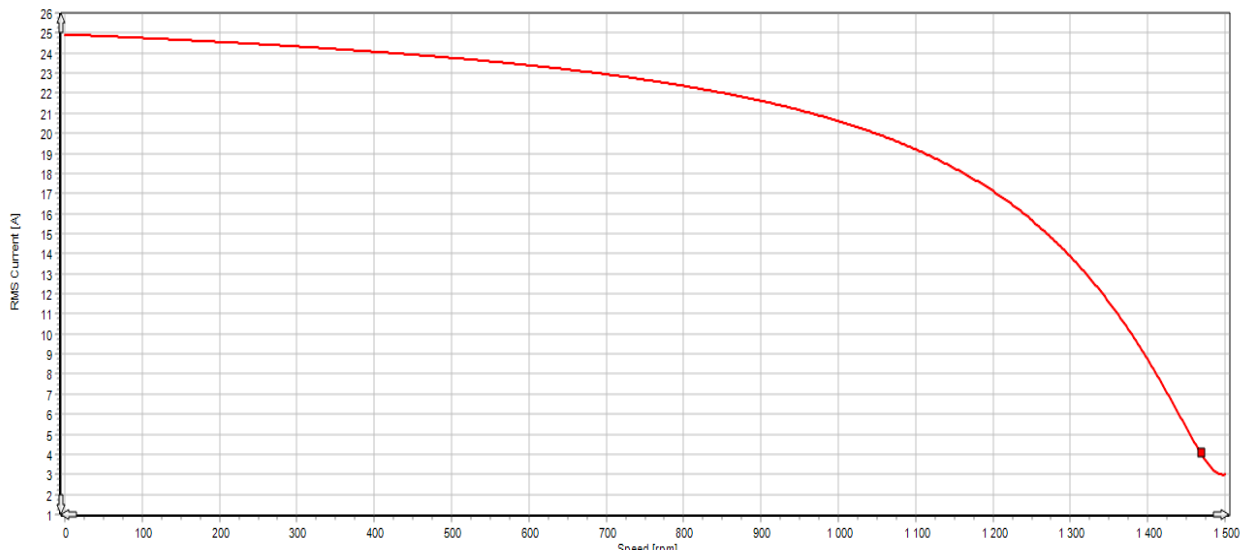


Figure. VI. 10 Courant de phase en fonction de la vitesse

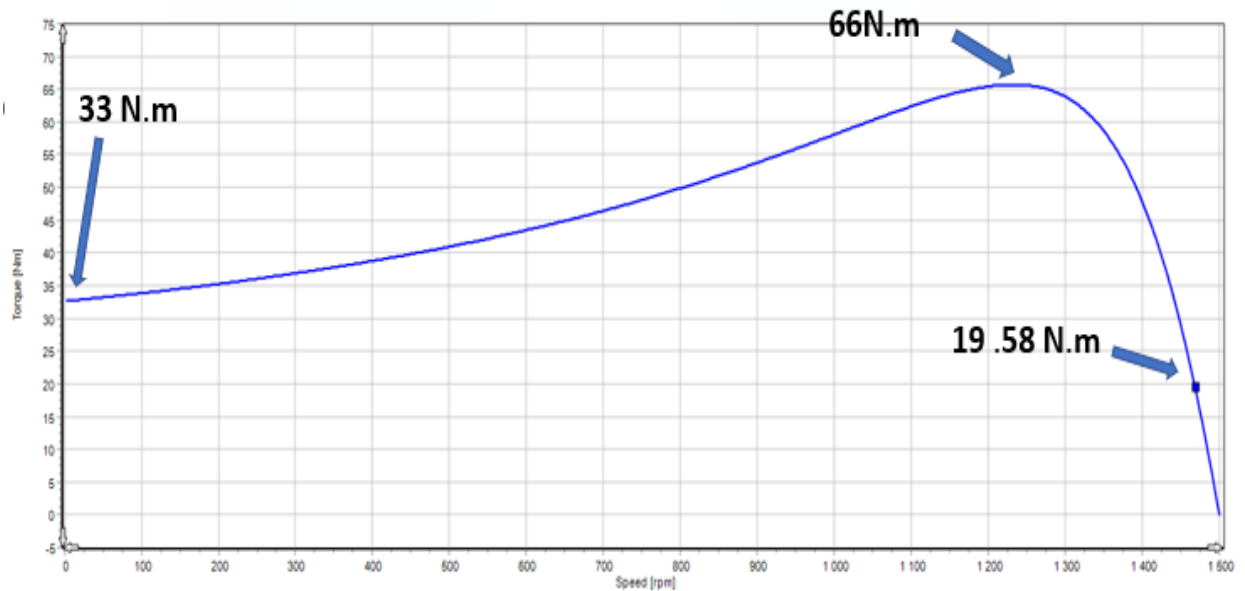


Figure. VI. 11 Couple du moteur en fonction de la vitesse

Sur la figure (VI.9) on a le courant de démarrage qui est égale à 25 A et la valeur nominale de courant de phase égale à 4 A.

D'après la figure (VI.10) on a le couple de démarrage du moteur égale à 33 N.m, le couple maximal égale à 66 N.m et le couple nominal de moteur égale à 19.58 N.m

IV.11. 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 :

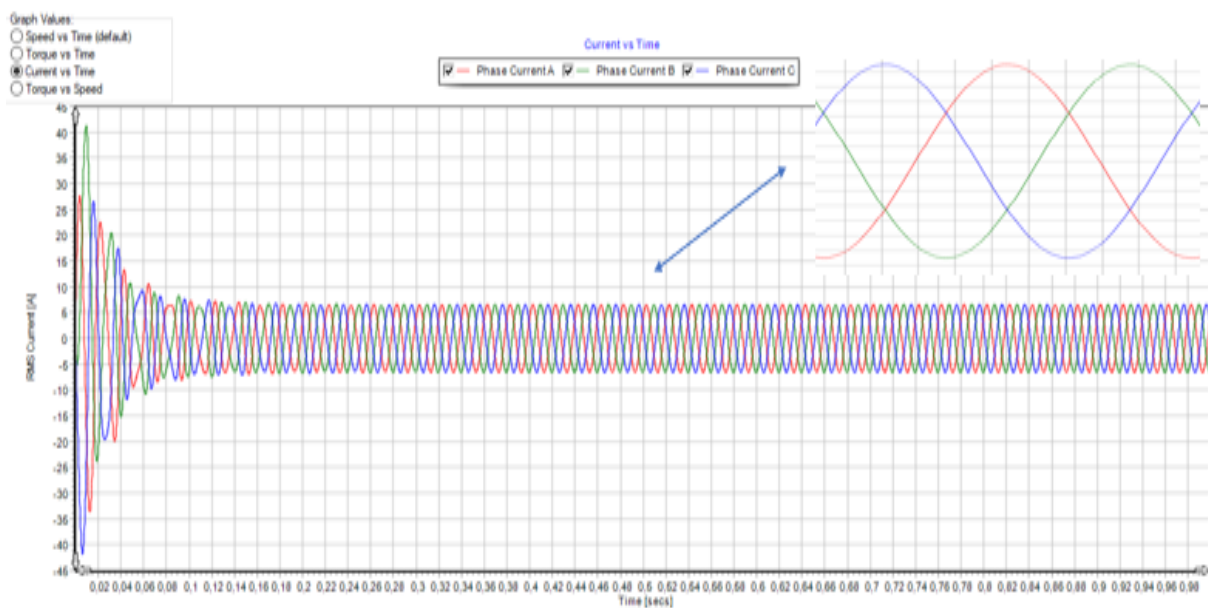


Figure. VI. 12 Courbes des courants de phases en charge

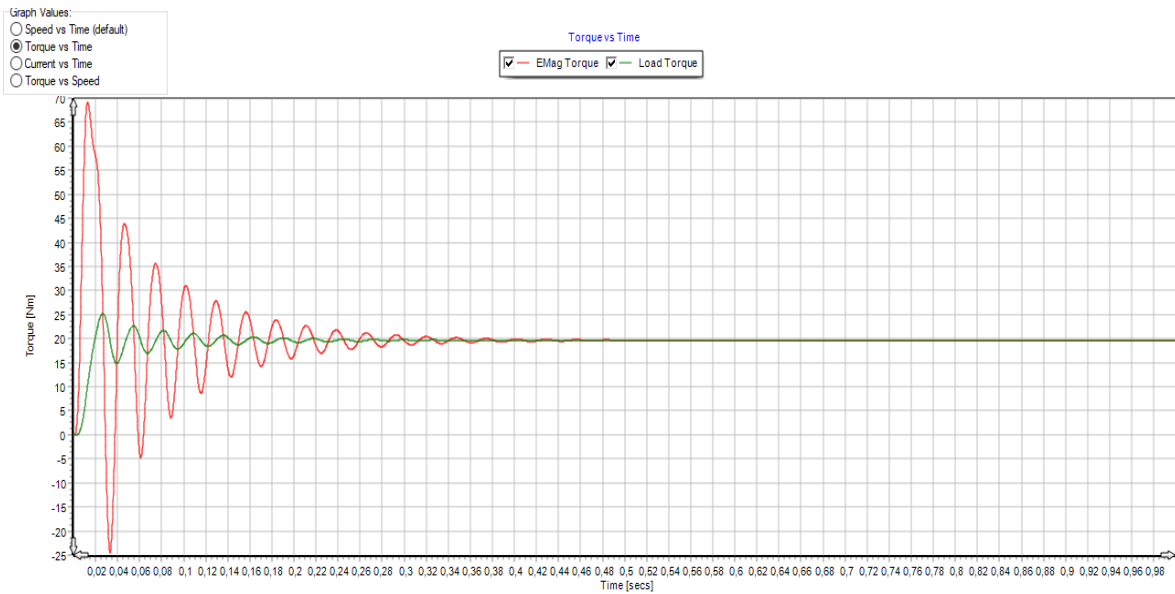


Figure. VI. 13 Courbe de variation de couple en fonction de temps

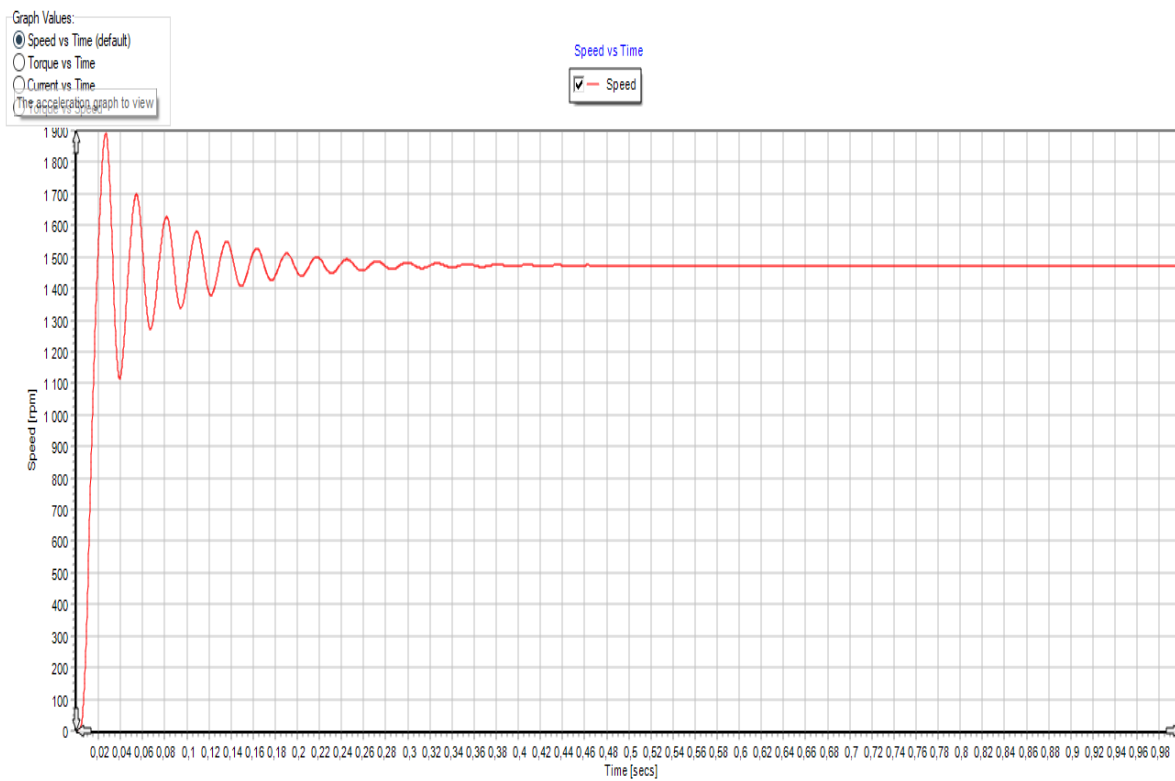


Figure. VI. 14 Courbe de vitesse de rotation en fonction de temps

D’après les trois graphes précédents, nous remarquons que notre conception répond bien au principe de fonctionnement du moteur asynchrone étudié et les valeurs de la simulation correspondent aux valeurs expérimentales obtenues par les différents essais à l’usine.

IV.12. Induction dans l'entrefer

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

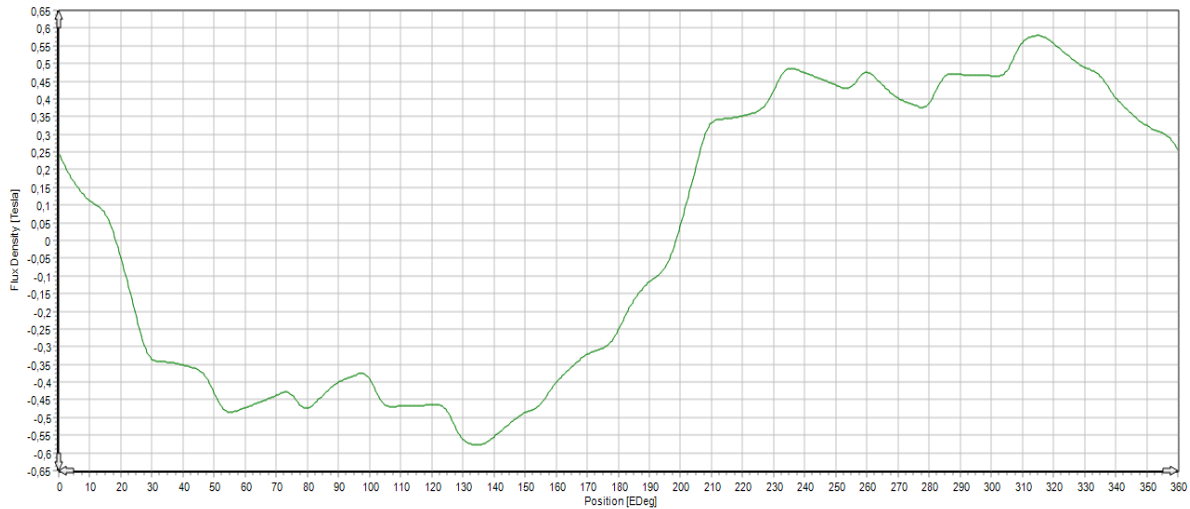


Figure. VI. 15 Distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer

De la figure (VI.15). Nous remarquons que le graphe n'a pas une allure parfaitement sinusoïdale ce qui est dû à la discontinuité de l'entrefer.

IV.13. Distribution de température à une température ambiante

La figure (IV.16) et la figure (IV.17) indiquent la répartition de la température de notre moteur en tenant compte de la température ambiante dans les ateliers de l'usine.

Après l'introduction des dimensions géométriques de la carcasse et des caractéristiques thermiques des matières de chaque composant du moteur, nous avons procédé à la simulation du modèle thermique de la machine. Nous avons réglé la température de chacun des composants du moteur à une température ambiante de 33 °C.

Motor-CAD

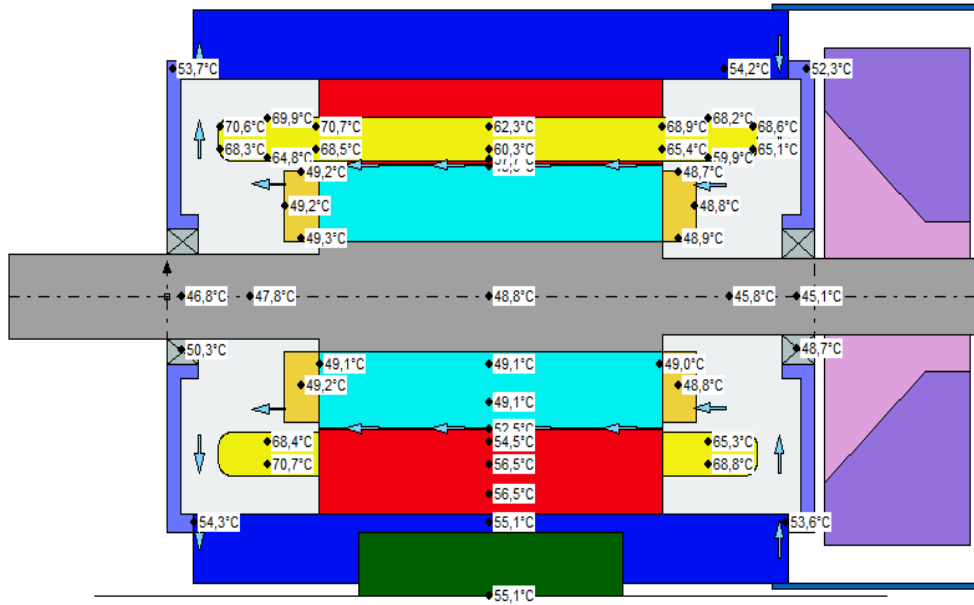


Figure. VI. 16 Vue axiale de la distribution de température du moteur de test par Motor-CAD

Motor-CAD

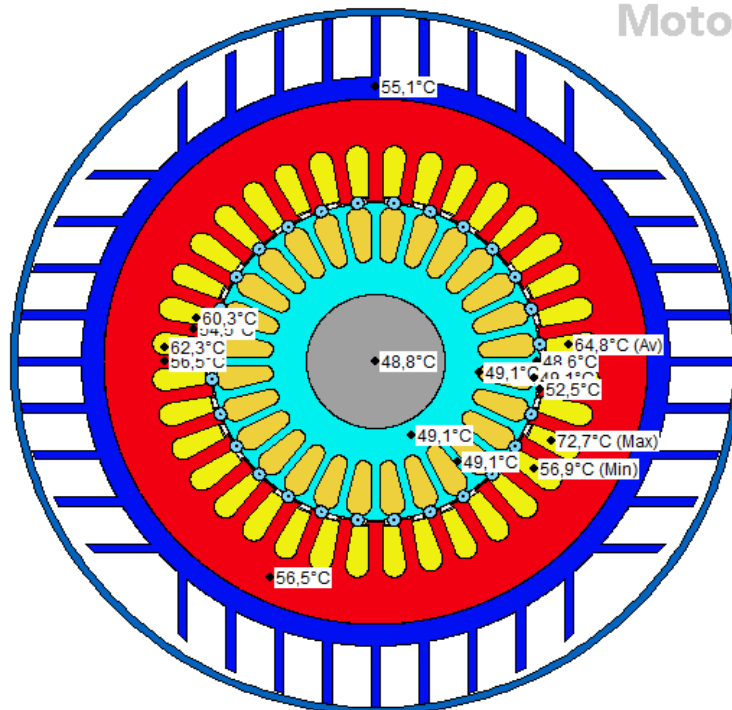


Figure. VI. 17 Vue radiale de la distribution de température du moteur par

Dans cet essai, les enroulements sont parcourus par un courant de valeur $I = 7A$. Les deux sources de chaleur sont les pertes en joules des bobinages et les pertes en fer du circuit magnétique du moteur.

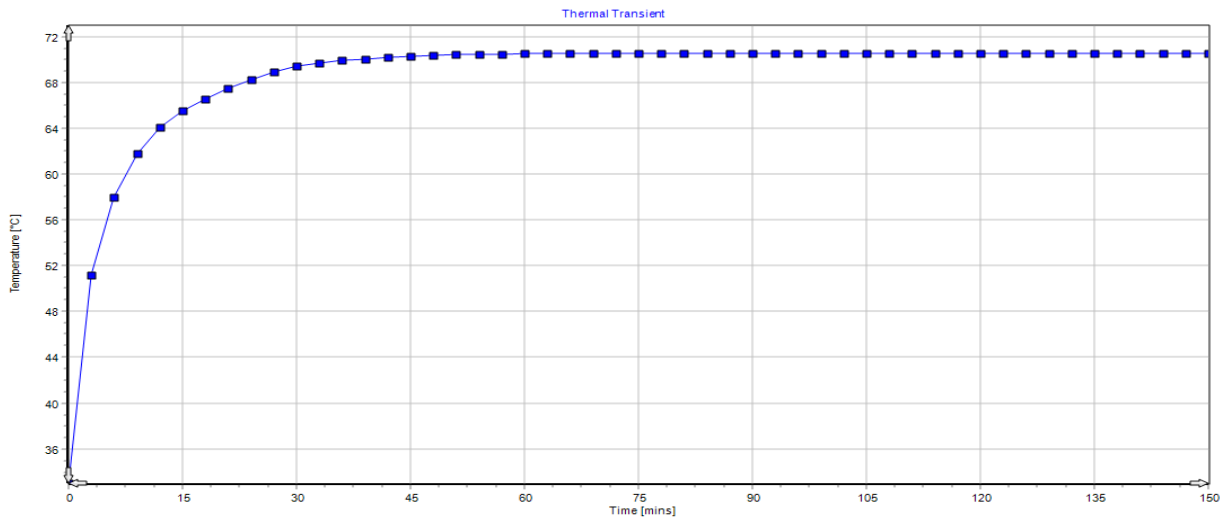


Figure. VI. 18 . Variation de la température dans les têtes de bobines

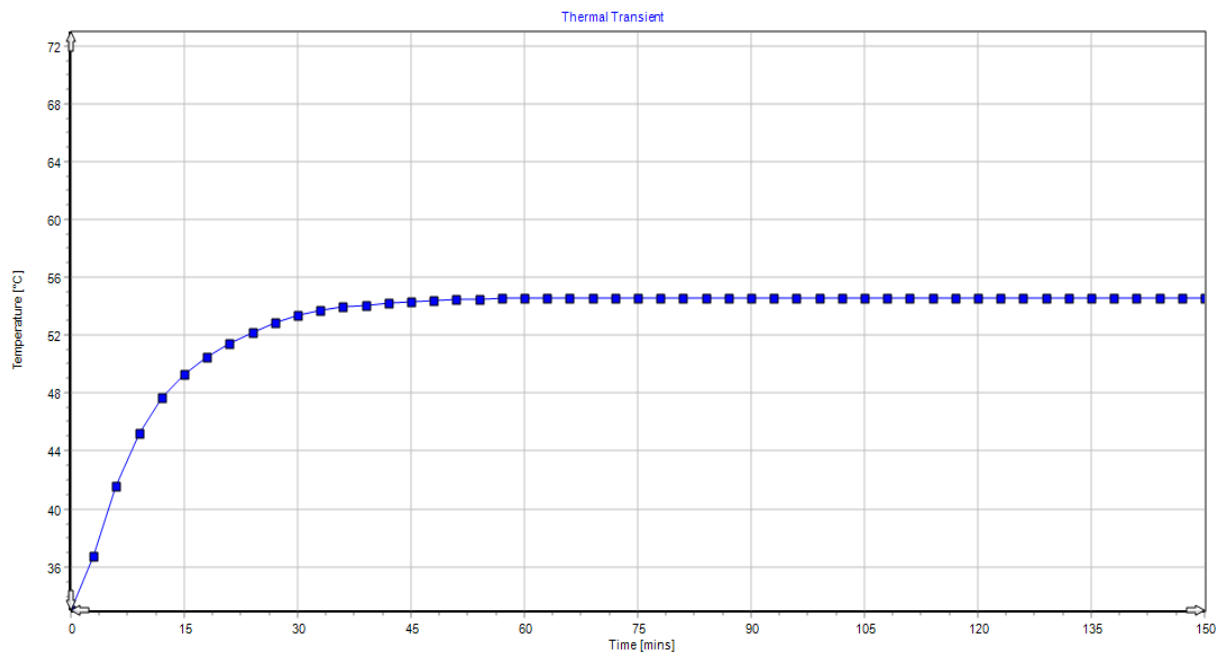


Figure. VI. 19. Variation de la température dans la carcasse du moteur

IV.14. Simulation de la machine avec défauts

Dans cette partie on réalise des simulations de la machine en tenant compte des défauts de type court-circuit entre les spires de la même phase.

IV.14.1. Court-circuit à 6 %

Pour le premier test, nous avons effectué un court-circuit à 6% du nombre total de conducteurs. Les figures ci-dessous montrent les résultats de la distribution et l'évolution de la température obtenus.

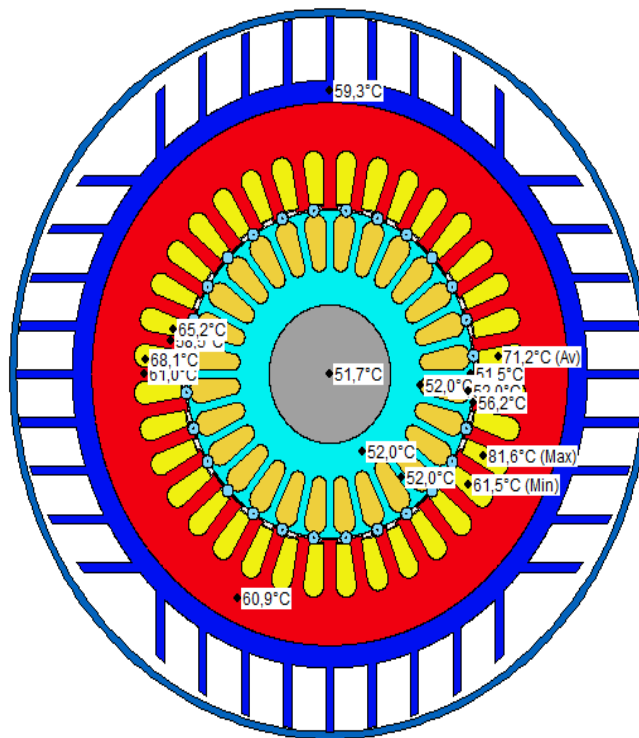


Figure. VI. 20 Vue radiale de la distribution de température du moteur avec un défaut de 6%

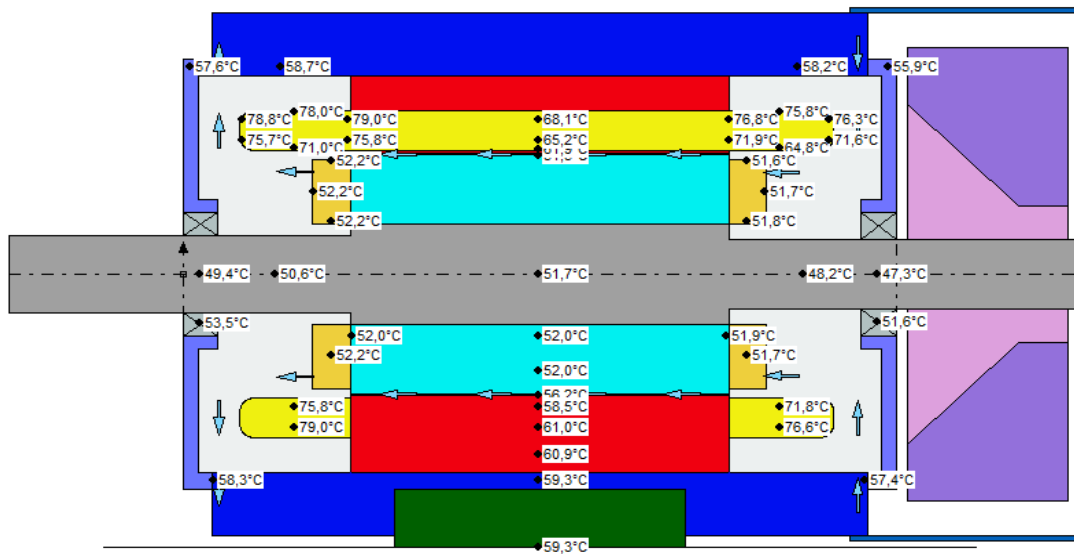


Figure IV.21. Vue axiale de la distribution de température du moteur avec un défaut de 6%

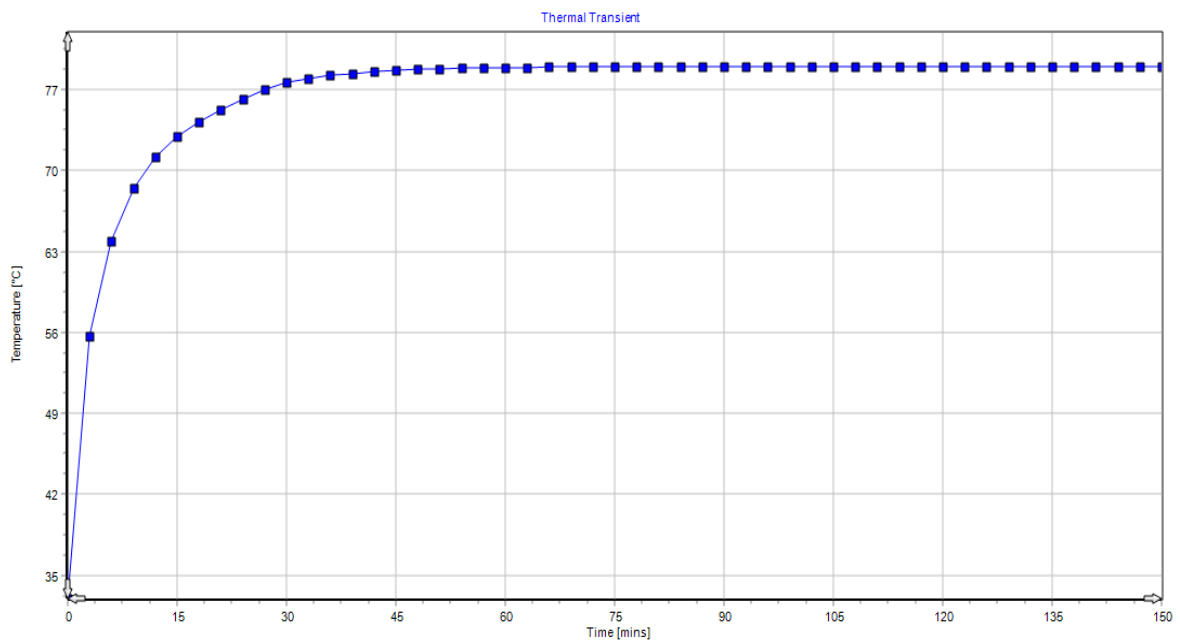


Figure. VI. 21 Courbe de variation de température dans les têtes de bobines avec défaut de 6%

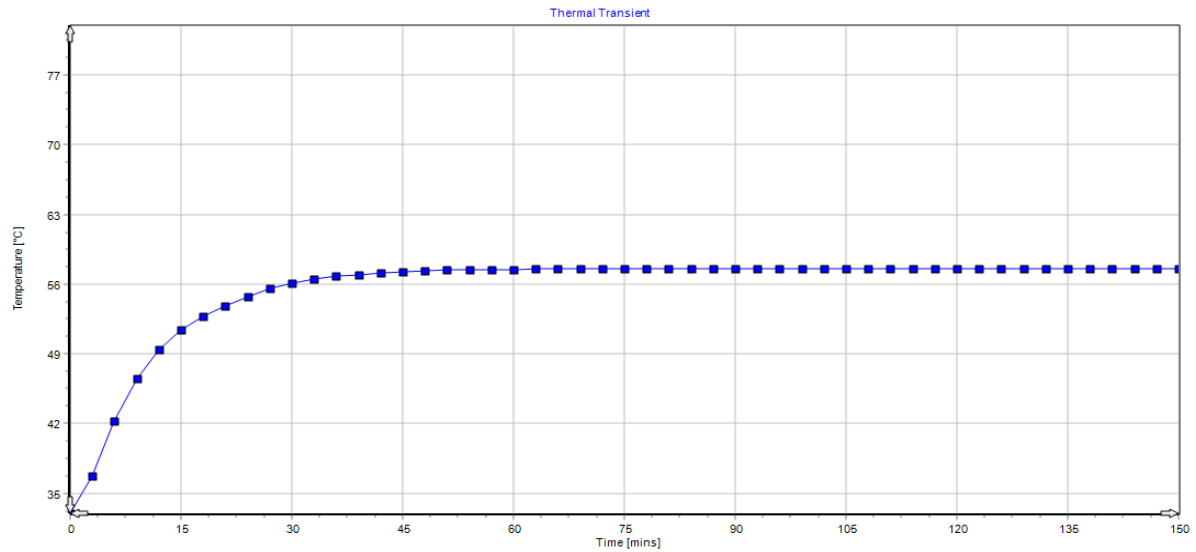


Figure. VI. 22 Courbe de variation de température dans la carcasse avec défaut de 6%

IV.14.2. Court-circuit à 11 %

Dans ce second test, nous avons effectué un court-circuit à 11% du nombre total de conducteurs. Les figures ci-dessous montrent les résultats de la distribution et l'évolution de la température obtenus.

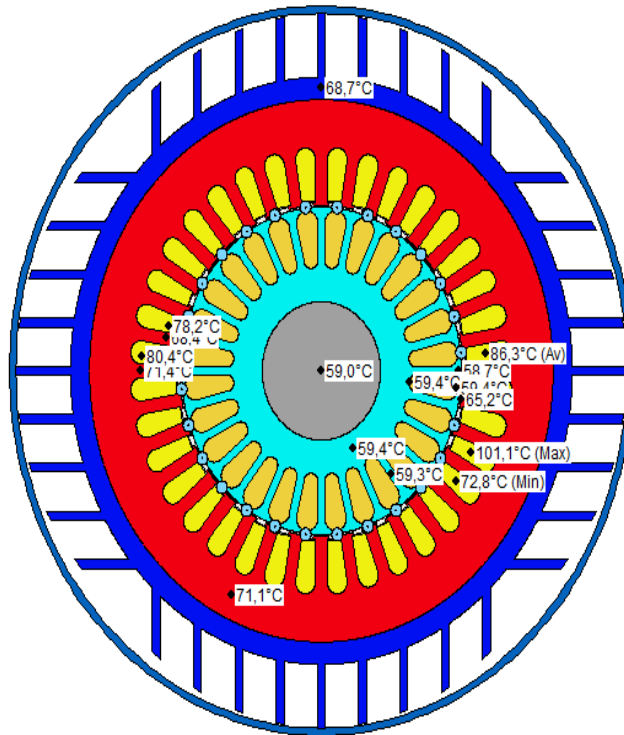


Figure. VI. 23 Vue radiale de la distribution de température du moteur avec un défaut de 11%

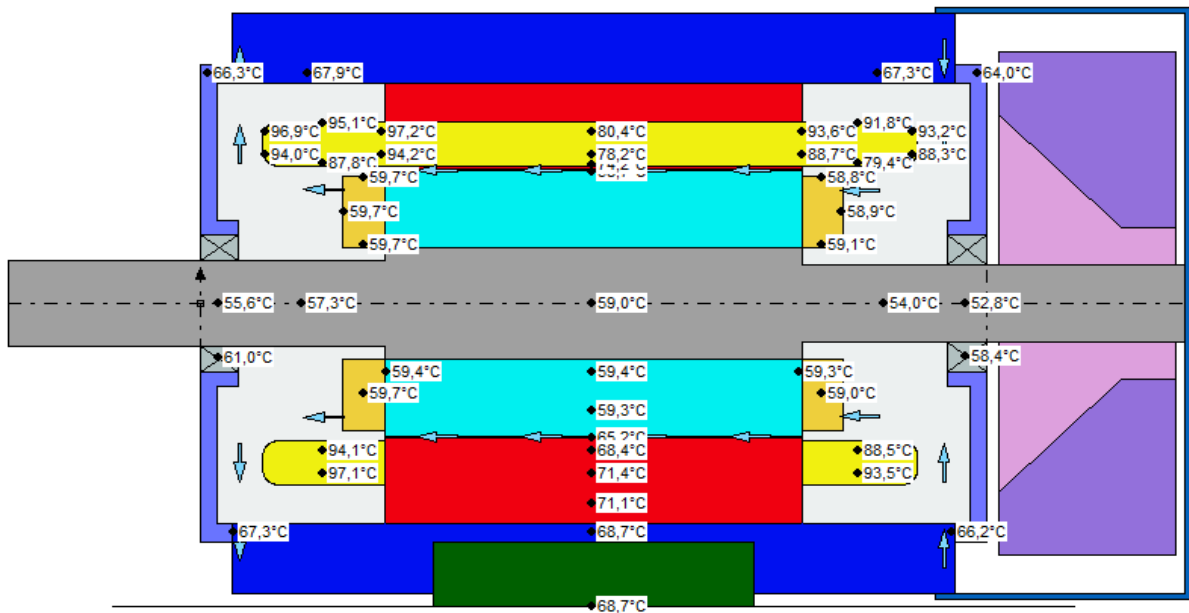


Figure. VI. 24 Vue axiale de la distribution de température du moteur avec un défaut de 11%

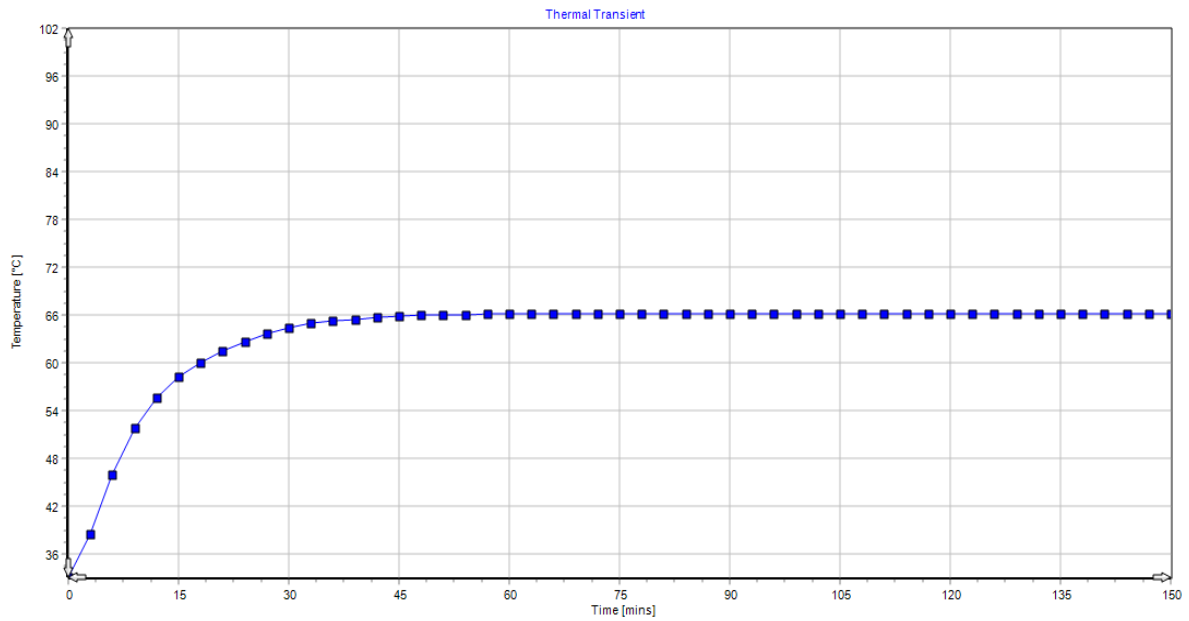


Figure. VI. 25 Courbe de variation de température dans la carcasse avec défaut de 11%

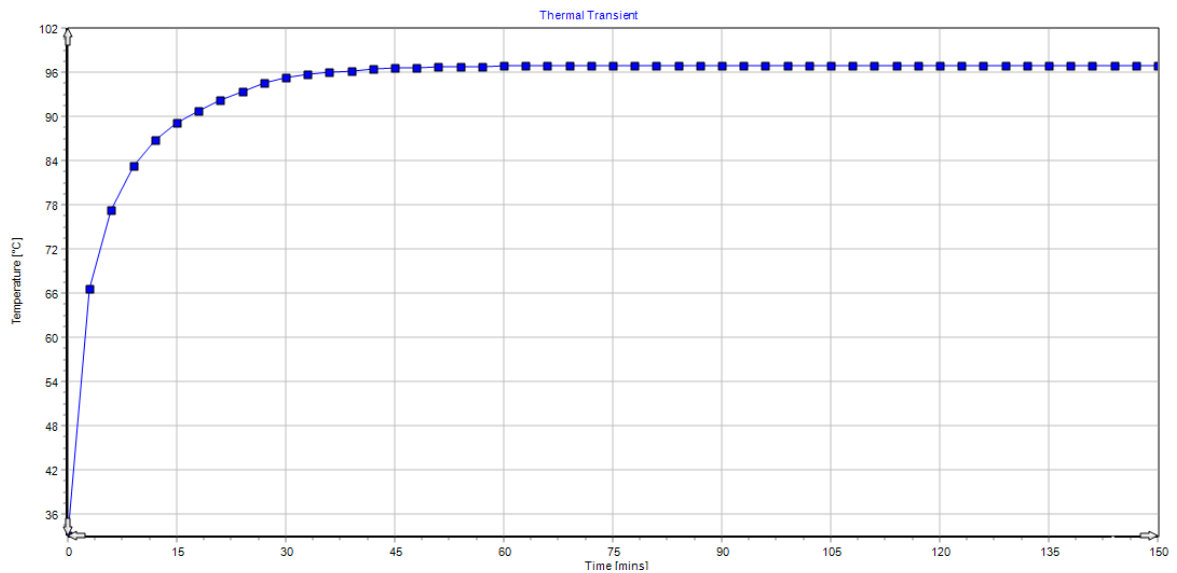


Figure. VI. 26 Courbe de variation de température dans les têtes de bobines avec défaut de 11%

IV.14.3. Court-circuit à 20 %

Pour le troisième et dernier test, un court-circuit de 20% des spires a été considéré. Les résultats obtenus sont présentés dans les figures ci-dessous.

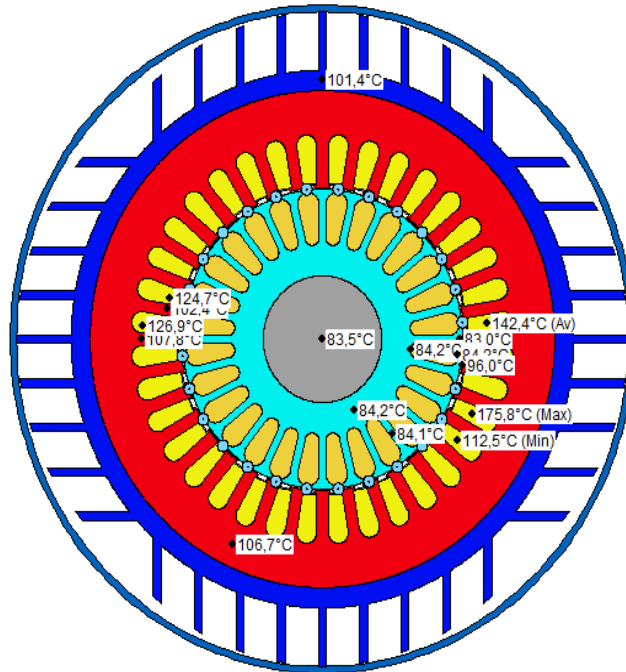


Figure. VI. 27 Vue radiale de la distribution de température du moteur avec un défaut de 20%

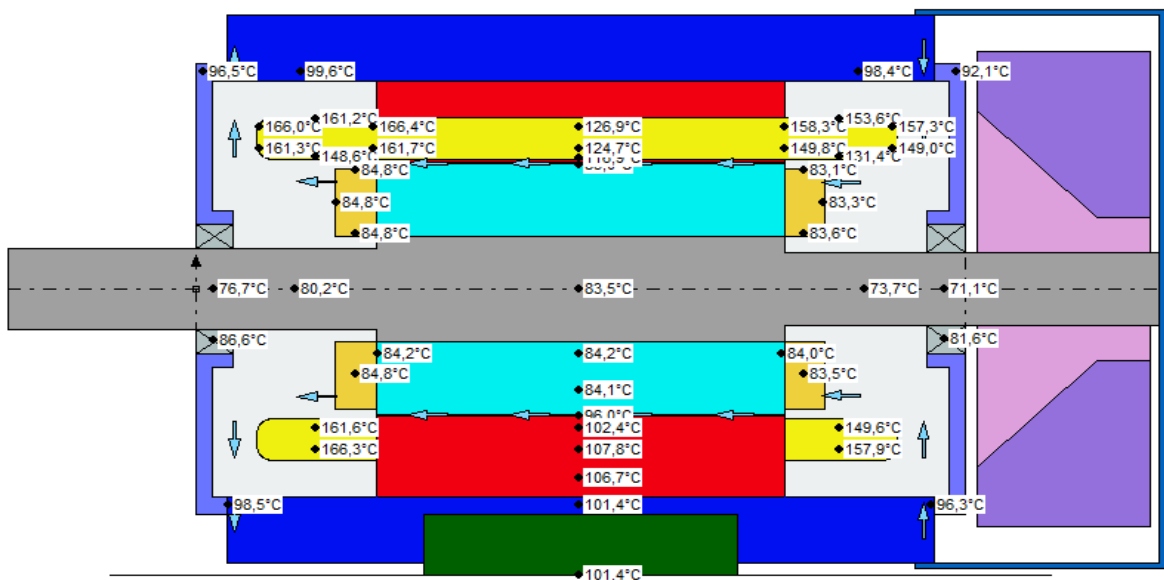


Figure. VI. 28 Vue axiale de la distribution de température du moteur avec un défaut de 20%

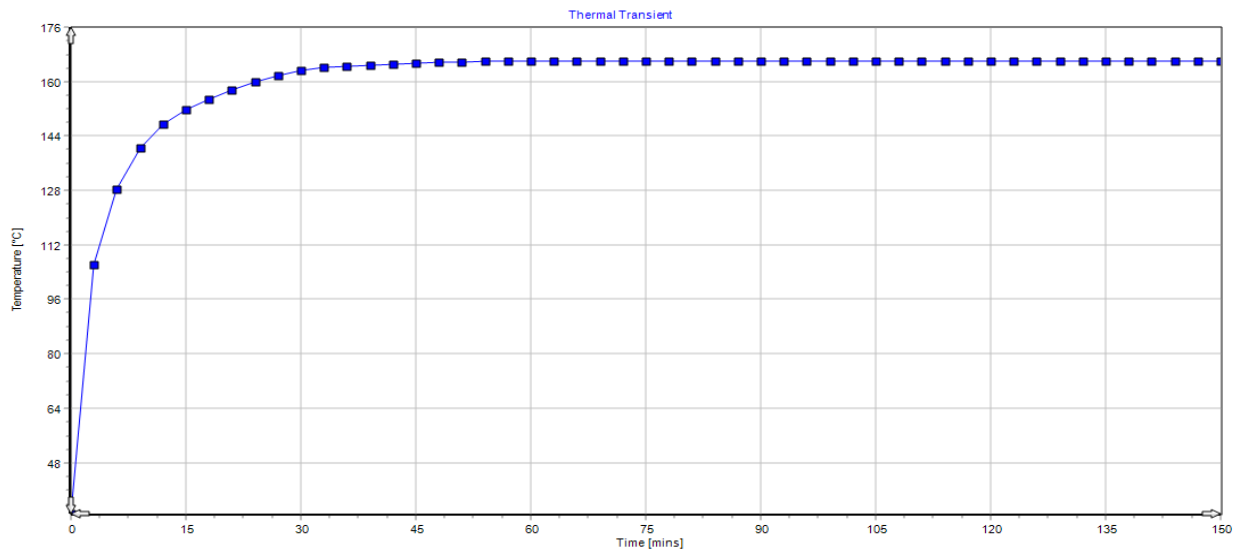


Figure. VI. 29 Courbe de variation de température dans les têtes de bobines avec défaut de 20%

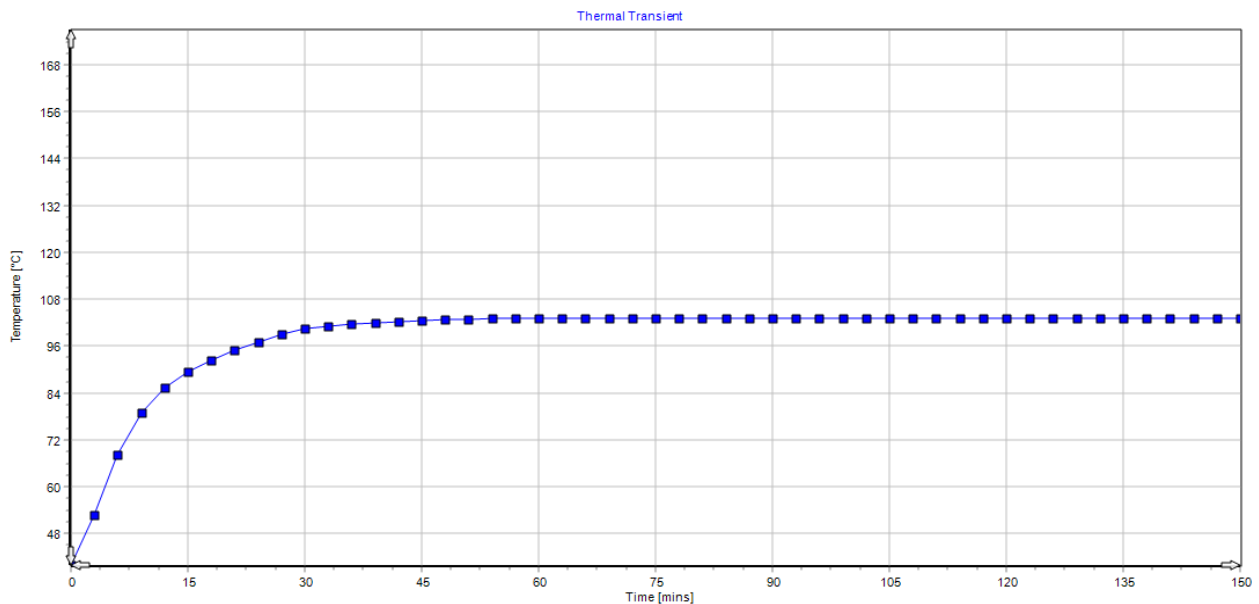


Figure. VI. 30 Courbe de variation de température dans la carcasse avec défaut de 20 %

D'après les résultats obtenus pour des défauts de court-circuit de 6%, 11% et 20 % du nombre total de spires, nous remarquons que la température dans les différentes régions de la machine augmente avec l'augmentation l'aggravation du défaut. Ce qui est expliqué par l'augmentation des pertes et du courant absorbé par le moteur.

Au delà d'un défaut de 20 % nous remarquons que l'augmentation de température à atteint une température de 166° ce qui dépasse la température limite de la classe d'isolation (F= 155°) ce qui va détruire notre bobinage.

IV.15. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé le comportement magnétothermique d'un moteur asynchrone en régime sain et en la présence de défauts de type court-circuit entre spires de la même phase.

Cette simulation, nous a permis de visualiser les résultats des différentes caractéristiques magnétiques et la distribution de la température dans les différentes régions de notre moteur.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Parmi l'ensemble des moteurs électriques, le moteur à induction est le plus répandu dans l'industrie, il n'est donc pas surprenant qu'il fasse encore l'objet de nombreuses recherches visant à améliorer sa modélisation et à optimiser sa conception. Bien que simple à fabriquer, la modélisation et le calcul des moteurs à induction demeurent non anodins.

D'ailleurs, le couplage qui existe entre les phénomènes électromagnétiques, thermiques et mécaniques impose la modélisation fine et simultanée de tous ces phénomènes. Ce problème complexe est difficile à résoudre en un temps raisonnable, et on est souvent amené à des simplifications, cependant, ces simplifications doivent être cohérentes avec le but visé.

Dans ce travail, nous avons utilisé la méthode des éléments finis pour la modélisation magnéto-thermique d'un moteur asynchrone de 3 kW fabriqué par la société nationale Electro-Industries d'Azazga.

Cette approche intégrée dans le logiciel de CAO Ansys Motor-CAD répond aux problématiques majeures inhérentes aux activités de conception (prédiction des performances, limitation du nombre de prototypes...) moteurs asynchrones, ce qui permet de changer les différents paramètres de la machine.

En fait, nous avons effectué deux simulations. La première est magnétodynamique pour déterminer les caractéristiques électromagnétiques de la machine. Puis, en transférant les résultats obtenus au solveur thermique du logiciel, nous avons été en mesure d'obtenir la distribution de la température dans les différentes régions de la machine, et ce, pour un régime sain et avec défauts de court-circuit entre spires de la même phase statorique.

Les résultats obtenus ont été comparés aux mesures fournies par la société. Un très bon accord a été observé.

Comme perspectives de ce travail, nous proposons :

- 1) L'étude de l'impact de l'augmentation de la température sur les propriétés électromécanique de la machine.
- 2) Intégration de la machine dans un entraînement électrique.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] A.Oukaci «Commande par mode glissant des paramètres électriques de la machine asynchrone», Mémoire de magister, Sétif, 2011.
- [2] I.djidjekh « Etude comparative des différents types de bobinage d'un moteur asynchrone triphasé à cage», Mémoire de master, Biskra, 2018.
- [3] K.Seddik F.Ibersiene « Modélisation de la machine asynchrone penta phasée en régime dégradé» Mémoire de master,Tizi Ouzou,2017.
- [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.Boudjlat A.Himoura «Etude et simulation d'une machine asynchrone alimente par un onduleur de tension a 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] R.Redjam «Calcule et conception assisté par ordinateur de machine électrique»» Mémoire de master, Constantine , 2006.
- [11] T.Wildy, G.Sybille, « Electrotechnique 4eme édition », édition De Boeck, Paris, 2005.
- [12] A.Louni ,M.Allouchene « Identification des paramètres électriques de la machine asynchrone a cage d'ecureuil » Mémoire de Master, Tizi Ouzou,2012.
- [13] C.Gabriel «Umcm Eléctrotechnique».

- [14] K. Madane « Mesure de la température dans le rotor d'une machine asynchrone a cage» Mémoire de Master, Tizi Ouzou, 2014.
- [15] R. Benfeda B. Amrane « Etude de la protection électrique des moteurs asynchrones triphasés » Mémoire de l'ingénieur, Tizi Ouzou, 2012.
- [16] K.Yahia «Contribution au diagnostic de la machine asynchrone triphasée par une approche signal» Thèse doctorat , Biskra, 2012.
- [17] A.Rezig S.Touati «Pronostic des défauts statoriques et rotoriques des machines asynchrones» Mémoire de Master,Jijel,2019.
- [18] A. Labdani « Simulation et étude expérimentale des défauts de la machine asynchrone de 1 KW » Mémoire de Master, Oum EL-bouaghi, 2017.
- [19] O.Olivier «Diagnostic par reconnaissance des formes application a un ensemble convertisseur-machine asynchrone» Thèse doctorat, lyon, 2006.
- [20] S.Sakhara «Diagnostic des défauts d'un entraînement électrique par la technique ondelette» Thèse Doctorat, Annaba, 2017.
- [21] A.Allal «Diagnostic des défauts rotoriques des machines asynchrones (résultats expérimentaux et de simulation)» Master Académique, El-Ouad, 2019.
- [22] N.Sadki «Simulation des défauts statorique d'un moteur asynchrone» Master Académique, Ouaregla, 2015.
- [23] M. Houioua « Etude comparative des différents facteurs de sévérité de défauts dans un moteur asynchrone triphasé » Mémoire de Master, Biskra, 2019.
- [24] M.Oumaamar « Surveillance et diagnosti des défauts rotoriques et mécaniques de la machine asynchrone avec alimentation équilibrée ou déséquilibré» Thèse doctorat, lorraine, 2012
- [25] F.Babou «Retour au réseau de la génératrice asynchrone auto-amorcée» Master Académique, Tizi Ouzou, 2019.

- [26] D.Aliane L.Fares « Analyse magnétothermique d'un moteur asynchrone sous l'environnement Ansys Motor-CAD»Mémoire de Master, Boumerdes, 2021.
- [27] B. Helifa « Simulation par éléments finis de la mesure par courants de foucault des fissures débouchantes dans les matériaux conducteurs» Thèse Doctorat, Alger, 2012.
- [28] Y. Choua « Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de foucault » Thèse Doctorat, paris,2009.
- [29] S.kessi « Détermination de la température de soudage des couronnes de court-circuit par le procede de chauffage par induction » Mémoire de master, Tizi ouzou, 2014
- [30] A. Akli W.Rebhi «modélisation thermique d'un moteur asynchrone» Mémoire de Master, Tizi Ouzou, 2013.
- [31] M. Bouheraoua « Contribution à la modélisation thermique d'un moteur asynchrone à Cage » Thèse Doctorat, Tizi Ouzou.
- [32] Bassel Assaad « Contribution à la prise en compte des aspects thermiques des machines électriques dans un environnement mécatronique » Thèse Doctorat, UTC Compiègne, 2015.
- [33] « www.etudier.com »

Résumé

De tous les moteurs électriques, les moteurs à induction sont les plus répandus dans le domaine industriel. Sans surprise, il reste donc l'objet de nombreux efforts de recherche visant à améliorer sa modélisation et à optimiser sa conception. Malgré leur simplicité de fabrication et de mise en œuvre, la modélisation et le calcul des moteurs à induction ne sont pas anodins. En effet, le couplage qui existe entre les phénomènes électromagnétiques et thermiques impose une simulation simultanée des deux phénomènes. L'objectif de ce travail est d'effectuer une modélisation magnétothermique d'un moteur asynchrone de 3 kW en régime sain et avec défauts. Pour cela, nous avons utilisé la méthode des éléments finis pour la simulation des caractéristiques électromagnétiques, et la distribution de la température dans les différentes régions du moteur. Des défauts de type court-circuit entre spires de la même phase ont été considérées (6%, 11%, 20%). Les résultats obtenus sont en bon accord avec la réalité physique.

Abstract

In the industrial sector, induction motors outperform all other types of electric motors. As a result, it is the subject of numerous research initiatives aimed at improving its modeling and optimizing its design. Despite their ease of manufacture and installation, induction motor modeling and calculation are not anodins. Indeed, the coupling between electromagnetic and thermal phenomena necessitates a simultaneous modeling of the two phenomena. The goal of this work is to perform a magnetothermic simulation of a 3 kW asynchronous motor in a safe and fault-free mode. We used the finite elements method to simulate electromagnetic properties and temperature distribution in different regions of the engine. short-circuit faults between conductors of the same phase have been considered (6 percent , 11 percent , 20 percent). The obtained results are consistent with physical reality.