

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Ingénierie des Systèmes Electriques
Mémoire de Master

Présenté par

FARES Lydia

ALIANE Dahbia

Filière :Electrotechnique

Spécialité :Machines Electriques

**Analyse magnétothermique d'un moteur
asynchrone sous l'environnement
Ansys Motor-CAD**

Soutenu le 15/07/2021 devant le jury composé de:

AOUZELLAG	Haroune	MCB	UMBB	Président
BOUDOUDA	Aimad	MCA	UMBB	Examineur
NAIT OUSLIMANE	Ahmed	MCB	UMMTO	Examineur
HAMEL	Meziane	MCB	UMBB	Encadreur
HADJAZ	Sadia	Ingénieur	Electro-industries	Co-encadreur

Année Universitaire : 2020/2021

Electro-Industries



Remerciements

Remerciements

Avant tout nous tenons à remercier Dieu tout puissant qui nous a donné la force, la santé et qui nous a préservés tout au long de ces longues années.

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

Nous tenons aussi à remercier notre encadreur Madame Hadjaz Sadia de nous avoir encadré au sein de l'entreprise. Nous tenons à la remercier pour son soutien continu et sa grande disponibilité pour nous diriger. On se souvient de ses conseils et de ses orientations pour bien suivre toutes les étapes de fabrication des moteurs asynchrones. Sans oublier également les employés et les ingénieurs d'ELECTRO-INDUSTRIE.

Nous vifs remerciements vont à Monsieur AOUZELLAG Haroune de nous avoir fait l'honneur de présider le jury de notre soutenance.

Nous remercions aussi, Monsieur BOUDOUDA Aimad, MCA à l'UMBB et Monsieur NAIT OUSLIMANE Ahmed, MCB à l'UMMTO, pour avoir accepté d'examiner notre travail.

Enfin, c'est par un grand plaisir qu'un devoir, d'exprimer notre gratitude et reconnaissance à toutes les personnes ayant contribuées de près ou de loin à la réalisation de ce travail

Dédicaces

Je dédie ce modeste 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 que je dois tous, qu'il trouve ici toute ma reconnaissance et la récompense de tous ses sacrifices.

A mes chères sœurs

A qui je souhaite toutes les réussites et le bonheur le long de leurs vies.

A mes amis

A tous mes amis, tous ce que j'aime, tous ce qui m'aiment et tous ceux qui me sont chers.

Sans oublier mon binôme FARES.Lydia

ALIANE.Dahbia

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail :

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences:

mon adorable mère.

A l'homme, sans lui, je n'aurais pas atteint cette étape de ma vie, qui doit ma vie, ma

réussite et tout mon respect : **mon cher père** paix à son âme.

A mes chères sœurset frères A qui je souhaite toutes les réussites et le bonheur le long de

leurs vies.

A tous les cousins, les voisins et les amis que j'ai connus jusqu'à maintenant, merci pour

leurs amours et leurs encouragements.

Sans oublier mon binôme **Aliane Dahbia** pour son soutien moral, sa patience et sa

compréhension tout au long de ce projet.

FARES.Lydia

Sommaire

Sommaire

Liste des figures.....	I
Liste des tableaux	IV
Liste des symboles.....	V
Introduction Générale	1
Chapitre I Présentation de l'entreprise Electro-Industries	
I.1. Introduction	3
I.2. Historique de l'entreprise	3
I.3. Présentation de l'entreprise	3
I.4. Présentation de l'unité Moteurs Asynchrones et Générateurs Electrique	4
I.5. Ateliers de découpage	5
I.5.1. Procédé de découpage	5
I.5.2. Empaquetage	6
I.5.3. Fabrication des capots de ventilateurs.....	7
I.6. Ateliers de moulage sous pression	8
I.7. Ateliers d'usinage.....	8
I.7.1. Fabrication de l'arbre	8
I.7.2. Usinage du rotor	9
I.7.3. Usinage des carcasses.....	10
I.8. Ateliers de bobinage.....	11
I.8.1. Secteur préparation isolation.....	11
I.8.2. Secteur de préparation des bobines	12
I.8.3. Secteur bobinage	12
I.9. Ateliers de montage.....	14
I.9.1. Secteur prés montage	14
I.9.2. Secteur montage final.....	14
I.10. Contrôle final	15
I.11. Normes	16

I.12. Conclusion.....	16
-----------------------	----

Chapitre II Généralités sur la construction de la machine asynchrone

II.1.Introduction.....	17
II.2. Eléments constituant la machine asynchrone	17
II.2.1. Stator	18
II.2.2. Le rotor	19
II.2.3. Rotor bobiné	20
II.3. Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone	21
II.5. Bobinage de la machine asynchrone.....	22
II.6. Les différents types d'enroulements	23
II.7. Matériaux dans les machines électriques.....	24
II.7.1. Matériaux magnétiques.....	25
II.7.2. Matériaux conducteurs.....	27
II.8. Isolation du bobinage.....	28
II.9.Les pertes dans les machines électriques	30
II.9.1. Les pertes dans le circuit électrique	31
II.9.2. Les pertes dans le circuit magnétique	31
II.9.2.1 Pertes par hystérésis.....	32
II.9.2.2. Pertes par courant de Foucault.....	33
II.9.3. Pertes mécaniques.....	34
II.9.3.1. Les pertes par frottement dans les roulements.....	34
II.9.3.2. Les pertes par ventilation.....	34
II.9.4. Les pertes supplémentaires	34
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	39
III. 3. 1. Introduction des potentiels	39
III. 3. 2. Formulation en champ électrique E	39
III. 3. 3. Formulation en champ magnétique H	39
III. 3. 4. Formulation électrique A – V	40
III. 4. Les équations des machines asynchrone à cage pour différents régions	41
III.5.Pertes Joules	41
III.6.Phénomènes thermiques	42
III.7. Lois de transfert de chaleur dans une machine électrique	42
III.7.1. Échange de chaleur par conduction	42
III.7.1.1 Loi de Fourier	42
III.7.2.Équation de conduction de la chaleur	43
III.7.3.Conductivité des matériaux	43
III.7.4.Échange de chaleur par convection	44
III.7.5.Échange de chaleur par rayonnement	45
III.7.6.Couplage magnétothermique Equations 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 Applications et Résultats

IV. 1. Introduction	49
IV. 2. Présentation de la machine	49
IV. 3. Présentation du logiciel Ansys-Motor-CAD	50
IV .4.Géométrie de la machine	51
IV. 4. 1. Calcul du bobinage	52

IV. 4.2. La Courbe de première aimantation	55
IV. 4.3.courbe des pertes spécifiques de tôle M800-50A.....	55
IV.5.1.1.Le maillage	56
IV. 5.1.2. Cartographie du champ magnétique.....	57
IV.5.1.3.Caractéristiques électromécaniques	57
IV.5.1.4.Caractéristiques magnétodynamique.....	58
IV.1.5.Induction dans l'entrefer	60
IV.5.2.1.distribution de température de modèle couplé électromagnéto-thermique à une température ambiante	61
IV.5.2.2.Effet de la ventilation	64
IV.5.2.3.Distribution de température moteur asynchrone en absence des ailettes	65
IV.6.Conclusion.....	67
Conclusion générale	68
Bibliographie.....	69

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.....	5
Figure I. 4: Procèdes de découpage.....	6
Figure I. 5: Tôles statoriques et rotoriques.....	6
Figure I. 6: Paquet statorique.....	7
Figure I. 7: Paquet rotorique.....	7
Figure I. 8: Capot de ventilateur.....	8
Figure I. 9: Arbre d'un moteur électrique après usinage.....	9
Figure I. 10: Fraisage de clavettes.....	9
Figure I. 11: Rotor à cage moulé.....	10
Figure I. 12: Rotor à double cage.....	10
Figure I. 13: Carcasses fonte usinée.....	10
Figure I. 14: Carcasse métal coulé(Aluminium).....	10
Figure I. 15: Flasque AS usiné.....	11
Figure I. 16: Flasque BS usiné.....	11
Figure I. 17: Boite à bornes en fonte usinée	11
Figure I. 18: Boite à bornes en alliage.....	11
Figure I. 19: Bobineuse de fil électrique.....	12
Figure I. 20: Bobineuse de fil électrique.....	12
Figure I. 21: Stator avec caniveau d'encoche isoles	13
Figure I. 22: Bobinage automatique.....	13
Figure I. 23: Pré montage du stator dans la carcasse.....	15
Figure I. 24: stator bobiné monté dans une carcasse.....	15

Chapitre II

Figure II.1. Vue éclatée d'un moteur asynchrone à rotor en court-circuit.....	18
Figure II.2. Paquet statorique et stator bobiné.....	19
Figure II.3. La disposition en biais des barres rotoriques.....	20
Figure II.4. Rotor bobiné.....	20

Figure II.5. Variation et orientation du champ tournant dans une machine asynchrone...	21
Figure II.6. Variation et orientation du champ tournant avec les angles dans une machine asynchrone.....	22
Figure II.7. Bobinage d'une machine électrique.....	23
Figure II.8. Schéma d'un enroulement concentrique.....	23
Figure II. 9. Schéma d'un enroulement imbriqué.....	23
Figure II.10. Schéma d'un enroulement ondulé.....	24
Figure II.11. Bobinages multipolaires.....	24
Figure II.12. Image d'une isolation des'encoches.....	28
Figure II.13. Différentes isolations dans l'encoche.....	29
Figure. II.14. Cycle d'hystérésis d'un matériau magnétique.....	33
Figure. II.15. Courant de Foucault dans le matériau magnétique.....	33
Figure.II.16. Différentes pertes dans une machine asynchrone.....	36

Chapitre III

Figure III.1. Domaine d'étude.....	37
FigureIII.2. conductivité thermique en fonction de la température.....	43
Figure.III.3. Distribution de l'air et de la température autour de la carcasse d'un moteur électrique.....	46
Figure. III.4. Elément à une dimension.....	47
Figure. III.5. Elément triangulaire à deux dimensions.....	47
Figure. III. 6. Elément carré à deux dimensions.....	48
Figure. III.7. Eléments à trois dimensions.....	48

Chapitre IV

Figure IV.1. Moteur asynchrone à cage d'écureuil 45 Kw.....	50
Figure IV.2. Interface de logiciel.....	51
Figure IV. 3 . Géométrie de la machine asynchrone à cage d'écureuil.....	52
Figure IV. 4: schéma de bobinage	54
Figure IV. 5: Distribution de bobinage.....	55
Figure IV.6 . Courbe de première aimantation de la tôle magnétique M800-50A.....	55
Figure IV. 7. Courbe des pertes spécifiques de tôle M800-50A.....	56

Figure IV.8 Maillage de moteur	57
Figure IV. 9. l'induction magnétique.....	57
Figure IV. 10. Courant de phase en fonction de la vitesse.....	58
Figure IV. 11. Couple du moteur en fonction de la vitesse.....	58
Figure IV.12. Courbes des courants de phases en charge.....	59
Figure IV.13. Courbe de variation de couple en fonction de temps.....	59
Figure IV.14. Courbe de vitesse de rotation en fonction de temps.....	59
FigureIV.15. Distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer.....	60
Figure IV. 16. Vue radiale de la distribution de température du moteur par Ansys Motor-CAD.....	61
Figure IV.17. Vue axiale de la distribution de température du moteur de test par Ansys Motor-CAD.....	61
Figure IV.18. Courbe de variation température maximale existée dans le moteur les tetes de bobine.....	62
FigureIV.19. Courbe de variation de température dans la carcasse en fonction de temps...62	
Figure IV.20 . Courbe de variation de température dans l'arbre en fonction de temps.....63	
Figure. IV.21 . courbe de variation de température dans le bobinage en fonction de temps.....63	
Figure IV.22. Vue radiale de la distribution de température du moteur par Ansys Motor-CAD.....	64
Figure IV.23. Vue axiale de la distribution de température du moteur de test par Ansys Motor-CAD.....	65
Figure IV.24: Vue radiale de la distribution de température du moteur sans ailettes par Ansys Motor-CAD.....	65
Figure IV.25. Vue axiale de la distribution de température du moteur sans ailettes par Ansys Motor-CAD.....	66

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II.1. Caractéristiques de quelques matériaux magnétiques.....	25
Tableau II. 2. Caractéristiques de Quelques Matériaux Magnétiques Durs (aimants).....	26
TableauII.3. Caractéristiques de Quelques Matériaux conducteurs Résistivité à 20°Celsius.....	27
Tableau II.4. Classification des Matériaux d'Isolants.....	30

Chapitre III

Tableau III.1. les coefficients échantés convectifs dans chaque mode de convection et de fluide.....	44
---	----

Chapitre IV

Tableau IV. 1 : Cahier de charges de la machine étudiée.....	49
Tableau IV. 2 : caractéristiques des bobines statoriques.....	54

Liste des symboles

Liste des symboles

A : Potentiel vecteur magnétique [T.m]

A : Charge linéaire [A.m]

B : Induction magnétique[T]

$B\delta$: Induction dans entrefer [T]

I_n : Courant nominale de la machine [A]

E : Champ électrique [V/m]

H : Champ magnétique [A/m]

J_i : Densité de courant induits[A/m²].

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

K_{B1} et K_{b2} : Coefficients qui tiennent compte de la diminution de la dispersion.

K_c ; Coefficient de KARTER.

K_{d1} : Facteur de distribution pour le fondamental.

K_E : Coefficient de majoration de la fem (0.9 :0.98)

K_{enc1} : Facteur de bobinage.

K_f : Facteur de forme de l'induction dans l'entrefer.

K_{ob} : Facteur d'oblicité des encoches rotoriques.

K_{r1} : Facteur de raccourcissement pour le fondamental.

M : Aimentation.

\vec{M} : Vecteur de l'aimentation locale matériaux.

m_1 : Nombre de phase de la machine.

N_n : Vitesse de rotation du rotor.

N_S : Vitesse de synchronisme.

NEMA : National Electrical Manufactures association.

p : Nombre de paires de pôles.

U_n : Tension d'alimentation [V]

U_1 : Tension simple statorique[V]

V : Potentiel scalaire électrique.

y_1 : Pas d'enroulement

τ : Pas polaire.

ϕ : Flux magnétique sous un pole.[Wb]

ϕ_r : Vecteur potentiel magnétique.[Wb]

α_i : Coefficient de recouvrement polaire. ($\alpha_i = \frac{2}{\pi}$)
 ρ : Résistivité. [$\Omega \cdot m$]
 ρ_{cu} Résistivité du cuivre .[$\Omega \cdot m$]
 Ω : Domine d'étude.
 ρ : Densité volumique de charge électrique.[C/m^3]
 μ_0 : Perméabilité magnétique du vide. $4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m]
 μ_r : Perméabilité magnétique relative de milieu.
 μ : Perméabilité magnétique absolue.
 σ : Conductivité électrique.
 ϵ : Perméabilité électrique absolue.
 ϵ_0 : Perméabilité électrique à vide.
 ϵ_r : Perméabilité électrique relative du milieu. $\frac{1}{36\pi} 10^9$ [F/m]
 α : Décalage entre deux phases consécutives.
 β : Rapport de raccourcissement.
 \vec{M} : L'aimantation locale du matériau
 R : Résistance du conducteur [Ω].
 I : courant traversant le conducteur [A].
 R_0 : Résistance à la température de référence T_0 [Ω]
 T : Température de conducteur [°C]
 α : Coefficient caractéristique du matériau,
 Ph : pertes par hystérésis [W/Kg]
 K_h : coefficient de Steinmetz ($h = 120$ à 380)
 f : fréquence [Hz]
 B_{max} : induction maximale [T]
 K_f : est un coefficient de pertes par courant de Foucault.
 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].
 A_m : est l'amplitude du potentiel vecteur A.
 A^* :est la valeur complexe conjuguée de A.

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

ρ : masse volumique (Kg/m³),

λ : conductivité thermique (W/m.°C),

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

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

h : coefficient d'échange convectif (W/m² .°C)

T_s : température de surface du solide (°C)

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

S : surface de contact solide-fluide (m²)

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

Introduction générale

Introduction Générale

De nos jours, l'utilisation des moteurs asynchrones est de plus en plus répandue, en particulier dans des environnements complexes et sous des conditions qui peuvent être sévères. Ces machines trouvent une place de plus en plus importante dans le monde du transport (véhicules hybrides/électriques, avions électriques, trains, bateaux, etc...), ou dans toute configuration de transfert d'énergie (domaines mécanique, hydraulique,...), ainsi que d'autres applications.

Dans les phases de conception des moteurs asynchrones, les contraintes thermiques constituent une problématique des plus exigeantes. Ces machines sont limitées par les niveaux de températures atteints dans certaines zones critiques comme les têtes de bobines. En effet, les moteurs risquent de perdre leurs performances lorsque des températures importantes sont atteintes. Par exemple, la température maximale tolérée dans le bobinage est celle de la destruction des isolants autour des conducteurs en cuivre. Si la température dans cette zone augmente et dépassent les limites de quelques degrés, la durée de vie de la machine en est significativement diminuée. C'est dans ce contexte que la modélisation magnétothermique des machines électriques prend toute son importance, en particulier les machines asynchrones.

Les modèles analytiques ont été longtemps utilisés et continuent de l'être grâce surtout à leurs faible temps de calcul, mais ceci moyennant des hypothèses simplificatrices importantes. Celles-ci ne sont plus acceptables quand de plus grandes précisions sont demandées.

La modélisation par éléments finis est un outil de modélisation d'une plus grande précision. C'est dans ce cadre que s'inscrit le travail que nous nous sommes proposé d'effectuer. Il s'agit de modéliser par éléments finis le comportement magnétothermique d'un moteur asynchrone pour l'obtention des caractéristiques électromagnétiques et le distribution de la température dans les différentes composantes du moteur.

Notre manuscrit est structuré en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous introduisons l'entreprise Electro-Industries d'Azazga le lieu où nous avons effectué notre stage pratique. Nous présenterons les

différents ateliers et les diverses procédures et démarches entreprises lors de la fabrication des moteurs asynchrones.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons des généralités sur la construction et le fonctionnement des moteurs asynchrones.

Ayant opté pour une modélisation numérique de ce type de moteur, le troisième chapitre traitera les équations mathématiques qui décrivent les phénomènes magnétiques et thermiques intervenant dans son fonctionnement.

Le quatrième et dernier chapitre, est consacré à l'application et aux résultats, il est scindé en deux parties : La première est relative aux résultats numériques de la simulation électromagnétiques d'un moteur asynchrone de 45 kW. Ensuite, vient la simulation thermique et la détermination de la distribution de la température dans les différentes zones du même moteur.

Enfin nous terminons par une conclusion générale qui résume les résultats de notre travail et les perspectives à aborder dans le futur.

Chapitre I

Présentation de

l'entreprise Electro-

Industries

I.1. Introduction

L'Electro-Industries est une entreprise spécialisée dans la conception, la fabrication et la commercialisation de matériel électrique industriel (transformateurs de distribution, moteurs électriques, génératrices et groupes électrogènes).

Dans ce chapitre nous allons présenter ladite entreprise où nous avons accompli notre stage de fin d'études. Nous présenterons les différentes étapes de fabrication des moteurs asynchrones ainsi que les différents ateliers par lesquels les moteurs transitent lors de leur fabrication.

I.2. Historique de l'entreprise

A l'origine, l'entreprise est issue de la réorganisation du secteur opérée en Algérie entre 1980 et 2000 qui a conduit en 1999 à la restructuration de l'ancienne ENEL (entreprise nationale des industries électrotechniques) en un certain nombre d'entreprises publiques économiques, sociétés par actions (EPE/SPA), parmi lesquelles figure « Electro-Industries » au capital social de 4 753 000 000 DA .

L'usine a été réalisée dans le cadre d'un contrat produit « clé en main » avec des partenaires Allemands, en l'occurrence, Siemens pour le produit et Fritz Werner pour l'engineering et la construction. L'infrastructure est réalisée par les entreprises Algériennes Ecotec, Cosider et Batimal [1].

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 est à signaler 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[1].

I.4. Présentation de l'unité Moteurs Asynchrones et Générateurs Electrique

Unité Moteurs Asynchrones et Générateurs Electrique (UMAGE) s'occupe de la fabrication des moteurs asynchrones à différentes puissances et à différentes hauteurs d'axes ainsi que les générateurs électriques. L'UMAGE se compose de différents ateliers :

- ❖ Ateliers de découpage.
- ❖ Ateliers de moulage sous pression.

- ❖ Ateliers d'usinage.
- ❖ Ateliers de bobinage.
- ❖ Ateliers de montage.

I.5. Ateliers de découpage

Dans cet atelier, on réalise tous les travaux de transformation de tôles utilisées pour la fabrication des pièces à savoir :

- ❖ Découpage et encochage des tôles statoriques et rotoriques puis leur emballage.
- ❖ Repoussage des agrafes et fabrication des capots et roues de ventilateurs.



Figure I. 3. Rouleaux de tôle magnétique

L'atelier reçoit des rouleaux de tôles magnétiques importées par Electro industries :

- ❖ Isolées au vernis pour les moteurs à hauteurs d'axe 183 mm à 404 mm.
- ❖ Non isolées : leurs isolation se fait dans des fours par oxydation pour les moteurs à hauteurs d'axe 70 mm à 163 mm.

I.5.1. Procédé de découpage

Le procédé le plus répandu dans cet atelier est celui de découpage automatique successif avec presse rapide. Ce procédé permet de découper et d'encochar dans le même cycle les tôles statoriques et rotoriques de différents types de moteurs selon la commande lancée à la machine.

Une fois découpées et encochées, les tôles statoriques et rotoriques sont évacuées vers l'extérieur de la machine par des convoyeurs, puis empilées séparément, deux autres procédés sont utilisés pour la fabrication des tôles statoriques et rotoriques.

- ❖ procédé de découpage automatique.
- ❖ procédé de découpage semi-automatique.

Tous ces procédés aboutissent au même résultat.



Figure I. 4. Procèdes de découpage

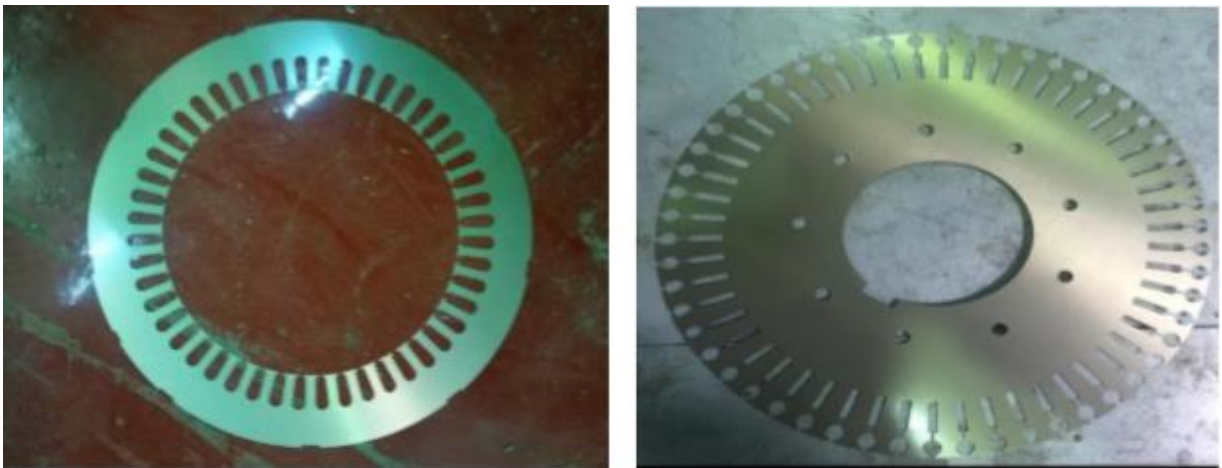


Figure I. 5. Tôles statoriques et rotoriques

I.5.2. Empaquetage

❖ Empaquetage dupaquet statorique

Il s'effectue après l'empilage des tôles selon la longueur du paquet statorique. L'opération est réalisée grâce à un outil monté sur une presse à empaquetage pour obtenir la longueur demandée, ensuite les tôles sont maintenues avec des agrafes placées dans les rainures avant de les presser à l'aide de quatre vérins [2].



Figure I. 6. Paquet statoriques

❖ **Empaquetage du paquet rotorique**

C'est le rassemblement des tôles rotoriques en paquet, il s'effectue selon la hauteur d'axe du moteur et la longueur du paquet statorique.

L'opération empile les tôles sur un calibre de tirage pour obtenir la hauteur du paquet rotorique demandée, la hauteur est contrôlée à partir de ces gabarits ainsi que des signaux lumineux sur la machine. Les paquets rotoriques sont maintenus grâce à des rivets.



Figure I. 7. Paquet rotoriques

I.5.3. Fabrication des capots de ventilateurs

A partir des tôles sous formes de disques en acier, on fait l'emboutissage par l'emboutisseuse, et pour la partie plane elle 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. 8. 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

Dans cet atelier se fait la fabrication des arbres du rotor ainsi que l'usinage des pièces comme le flasque, rotor, carcasse...

I.7.1. Fabrication de l'arbre

Une fois l'acier est contrôlé positivement, on découpe les arbres à l'aide d'une scie mécanique ou avec une scie automatique. L'arbre à l'état brut passe au centre d'usinage pour être centré, cette opération consiste à percer deux trous qui servent de référence pour pouvoir tourner notre rotor dans un axe bien précis.

Une fois que le tournage est achevé, l'arbre est acheminé à l'atelier de moulage sous pression pour l'emmancher au paquet rotorique et mouler la cage d'écureuil, cependant on ne parle plus d'arbre mais de rotor, ce dernier est envoyé à l'atelier d'usinage pour être usiné et rectifié [3].



Figure I. 9. Arbre d'un moteur électrique après usinage

I.7.2. Usinage du rotor

Les opérations effectuées sur le rotor sont :

- ❖ **Tournage du paquet** : cette opération se fait avec un tour parallèle pour avoir un entrefer homogène et réduit.
- ❖ **Rectification** : elle consiste à la rectification des sièges de roulement et les sorties d'arbre à l'aide d'une rectifieuse.
- ❖ **Fraisage** : fraisage de la rainure de clavette coté entraînement à l'aide d'une fraiseuse.



Figure I. 10. Fraisage de clavettes

- ❖ **Equilibrage du rotor** : cette opération ne se fait qu'après avoir reçu l'ordre de montage du rotor, deux méthodes d'équilibrage sont utilisées :

1. Equilibrage positif avec l'ajout de rondelles acier.
2. Equilibrage négatif avec enlèvement de matière.



Figure I.11. Rotor à cage moulé



Figure I. 12: Rotor à double cage

I.7.3. Usinage des carcasses

L'alésage de la carcasse à l'aide des trous verticaux pour recevoir. Perçage et taraudage des trous de fixation sur lesquels sont fixés les flasques AS et BS et la boîte à bornes, à l'aide des perceuses, taraudeuses à broches multiples.



Figure I. 13. Carcasses fonte usinée



Figure I. 14. Carcasse métal coulé (Aluminium)

❖ **Flasques (AS et BS) :** Tournage des bords de centrage et cage de roulements.



Figure I. 15. Flasque AS usiné



Figure I. 16. Flasque BS usiné

- ❖ **Boîte à bornes :** -Perçage et taraudage des trous de fixation recevant le couvercle à l'aide de perceuse à broches et Perçage et taraudage du trou de la mise à la terre.



Figure I.17. Boîte à bornes en fonte usinée

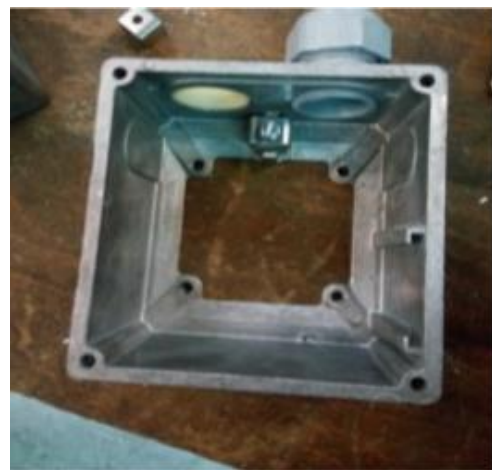


Figure I. 18. Boîte à bornes en alliage

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

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.



Figure I. 19. Bobineuse de fil électrique **Figure I. 20.** Préparation des bobines

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.

a) Insertion des caniveaux d'encoches

Cette opération se fait grâce à une machine qui découpe le papier isolant et le pénètre automatiquement dans les encoches du stator.

b) 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 pendant 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, après cela, 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. 21. Stator avec caniveau



Figure I. 22. Bobinage automatique d'encoche isolées

c) Connexion

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

d) 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 distinguées des autres avec des couleurs, Phase U : orange ; Phase V : noir et Phase W : rouge.

e) 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 pour donner la forme et les dimensions définitives des têtes de bobines coté AS et BS.

f) 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 pas de court-circuit entre spires, court-circuit entre phase 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.

g) 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 prés montage

Les opérations réalisées dans ce secteur sont :

- ❖ Huiler l'intérieur de la carcasse pour faciliter l'insertion du paquet statorique.
- ❖ Emmanchement du paquet avec une presse.
- ❖ Mise en longueur et tournage des bords de centrage de la carcasse coté AS et BS
- ❖ Fraisage des pattes pour retrouver la hauteur d'axe exact.
- ❖ Peinture du diamètre intérieur du stator avec une couche de peinture antirouille.

I.9.2. Secteur montage final

Dans ce secteur sont effectuées les opérations suivantes :

- ❖ Mise en place du couvercle du palier intérieur coté BS pour assurer une bonne étanchéité du moteur.
- ❖ Emmanchement des roulements déjà graissés coté AS et BS avec une presse verticale et emplacement de la clavette coté AS.
- ❖ Visser les couvercles de palier sur flasque, cela permet de cerner le roulement entre ces deux pièces.
- ❖ Emplacement de la clavette coté BS et emmanchement du ventilateur avec la même presse puis insertion de la bague d'arrêt (serre clips) pour ventilateur.
- ❖ Intégration du rotor complet dans le stator et fixation du flasque coté BS avec des vices.
- ❖ Emplacement des rondelles (rondelles de compensation et rondelles élastiques) sur le flasque coté AS pour éviter le jeu axial du rotor.
- ❖ Fixation du flasque sur la carcasse avec des vices ainsi que le montage du capot du moteur
- ❖ Préparation de la boîte à bornes et fixation des câbles de raccordement sur la plaque à bornes.



Figure I. 23. Pré montage du stator dans la carcasse



Figure I. 24. Stator bobiné monté dans une carcasse

I.10. Contrôle final

Une fois le produit est fini, ce dernier subit un certain nombre de contrôles électriques. Dans le contrôle électrique, on lui applique trois principaux :

- ❖ Essai à vide.
- ❖ Essai en court-circuit.
- ❖ Essai en charge.

On contrôle aussi un certain nombre de paramètres du moteur comme :

- ❖ Voilure flasque-bride.
- ❖ Concentricité flasque-bride
- ❖ Concentricité bout d'arbre
- ❖ bout d'arbre incliné
- ❖ longueur bout d'arbre
- ❖ Ecart trous de patte-arbre
- ❖ Ecart trous de patte (cotés AS, BS)
- ❖ Hauteur d'axe
- ❖ Jeu axial du rotor
- ❖ Bout d'arbre endommagé
- ❖ Bord de centrage endommagé
- ❖ Plaque signalétique endommagé
- ❖ Rainure de clavette endommagée

I.11. Normes

Les moteurs sont conformes aux normes suivantes [4] :

- ❖ 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

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'entreprise Electro-Industries où nous avons effectué notre stage de fin d'études. Ce dernier a été accompli à l'unité moteurs électrique sous la direction d'un ingénieur d'état en électrotechnique avec qui nous avons pu assisté aux différentes étapes de fabrication des moteurs asynchrones qui font l'objet de notre étude.

Chapitre II
Généralités sur la
construction de la
machine asynchrone

II.1.Introduction

Actuellement, les machines asynchrones sont considérées comme l'outil de conversion Electromécanique le plus utilisé dans le milieu industriel. Cet engouement pour ce type de machine est justifié par sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et sa robustesse mécanique. Des applications de la machine asynchrone à vitesse variable, ont vu le jour dans divers domaine en l'occurrence l'aéronautique, la robotique et dans certains mécanismes industriels à haute précision [5].

Dans ce chapitre, nous présenterons quelques généralités sur les éléments de construction des moteurs asynchrones ainsi que sur leur principe de fonctionnement.

II.2. Eléments constituant la machine asynchrone

Deux composantes principales constituent le moteur asynchrone, souvent appelé moteur à induction. Elles sont faites de tôles d'acier au silicium et comportent des encoches dans lesquelles on place les enroulements.

L'une des composantes, appelée le stator, est fixe, on y trouve les enroulements reliés à la Source. L'autre composante, nommée le rotor, est montée sur un axe et libre de tourner.

Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieur ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on reconnaît deux types de rotor : le rotor bobiné et le rotor à cage d'écureuil.

Dans le cas du rotor bobiné, aussi appelé rotor à bagues, l'enroulement triphasé, relié en étoile ou en triangle, est connecté à trois bagues qui le rendent accessible de l'extérieur par l'intermédiaire de balais. On peut ainsi le court-circuiter comme cela se produit en marche normale, insérer des résistances dans le circuit lors du démarrage et dans certains cas spéciaux de fonctionnement ou y raccorder un convertisseur de courant à thyristors afin de régler le courant de démarrage et la vitesse en marche [6].

Depuis quelques années, le moteur à bagues a été délaissé au profit du moteur à cage piloté par des convertisseurs à fréquence variable.

Les encoches du rotor à cage d'écureuil comportent des barres en cuivre ou en aluminium réunies entre elles de part et d'autre du rotor par des anneaux. Dans le cas de moteurs de faible puissance et même de puissance moyenne, les cages sont en aluminium coulé sous vide partiel et pression. Ce procédé permet d'éviter la présence néfaste de bulles

d'air dans les barres et d'obtenir en une seule opération les barres, les anneaux de chaque extrémité et parfois même les Ailettes de ventilation. Toutefois, dans les petits moteurs de fabrication récente, on utilise plutôt Des ailettes en plastique, étant donné que cette matière est beaucoup moins coûteuse que l'aluminium [7].

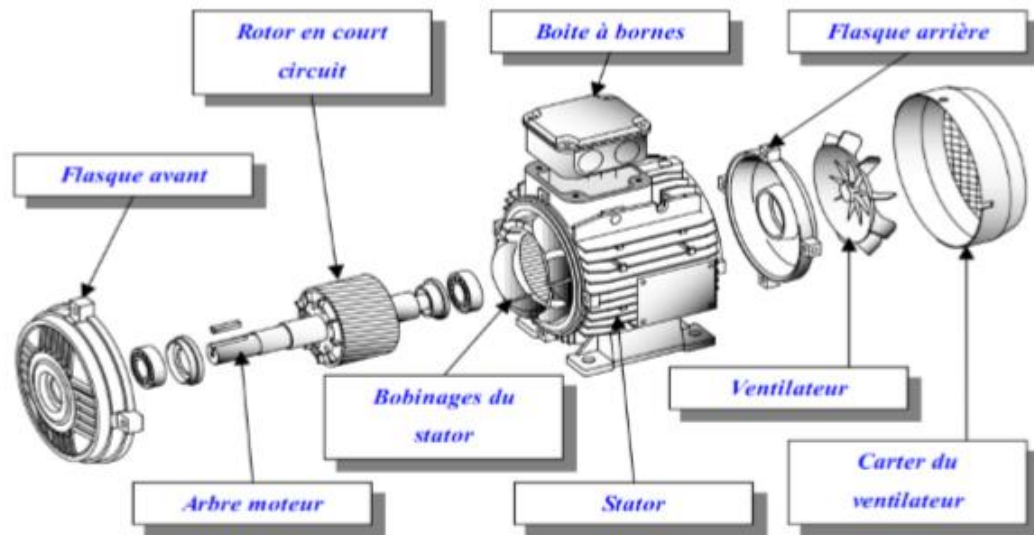


Figure II.1. Vue éclatée d'un moteur asynchrone à rotor en court-circuit

II.2.1. Stator

Il est constitué 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 (Figure II. 2). Le bobinage statorique Peut se décomposer en 2 parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines [7].

Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique.

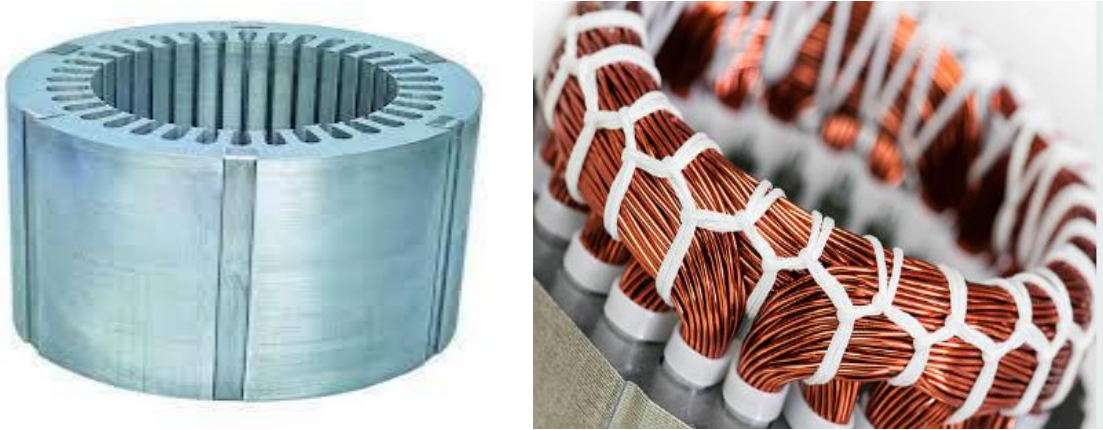


Figure II.2. Paquet statorique et stator bobiné

Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple Électromagnétique [8].

II.2.2. Le rotor

Le rotor est fait, comme le stator, de tôles empilées et habituellement du même matériau, dans les petits moteurs, les tôles sont découpées en une seule pièce et assemblées sur un arbre, dans de plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections et montée sur un moyeu.

Pour les rotors du type bobiné, les enroulements et leurs différents aspects sont semblables à ceux du stator. Ils présentent toutefois la particularité d'être connectés à des bagues sur lesquelles frottent des balais qui rendent le circuit du rotor accessible de l'extérieur.

Dans le cas des rotors à cage d'écureuil, les encoches sont habituellement du type semi-ouvert, mais on utilise parfois des encoches fermées, les enroulements sont constitués de barres court-circuitées par un anneau terminal placé à chaque extrémité du rotor. Les barres des gros moteurs sont généralement en cuivre ou, à l'occasion, en laiton. Par contre, les barres des petits moteurs sont en aluminium; on utilise de plus en plus le coulage d'aluminium pour des moteurs de plusieurs dizaines et même de quelques centaines de kilowatts. L'aluminium coulé permet de fabriquer les anneaux terminaux en même temps que les barres qui épousent la forme de l'encoche, qui peut être tout à fait quelconque. Puisque la tension induite dans les barres du rotor est faible, aucune isolation n'est requise entre les barres et les dents.

Pour former le rotor, on empile généralement les laminations de façon que les conducteurs soient obliques par rapport à l'axe du moteur (Figure II. 3). Cette disposition a pour effet de réduire considérablement le bruit et les sous harmoniques durant l'accélération et de donner un démarrage et une accélération plus uniforme, en plus d'éviter l'accrochage et les oscillations à faible charge [9].

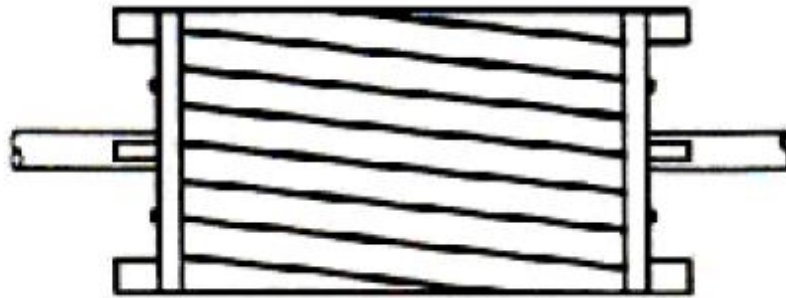


Figure II.3. La disposition en biais des barres rotoriques

II.2.3. Rotor bobiné

Plus complexe est muni d'un enroulement triphasé, composé de bobines multi spires logées dans des encoches. L'enroulement généralement couplé en étoile est connecté à trois bagues conductrices isolées les unes des autres sur lesquelles viennent frotter des balais en graphite, permettant un accès électrique au rotor.



Figure II.4. Rotor bobiné

II.3. Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone

Le principe de fonctionnement des moteurs à courants alternatifs réside dans l'utilisation d'un champ magnétique tournant produit par des tensions alternatives. Dans le cas du moteur triphasé, les trois bobines sont disposées dans le stator à $2\pi/3$ les unes des autres, trois champs magnétiques sont ainsi créés (Figure II. 5). Compte tenu de la nature du courant sur le réseau triphasé, les trois champs sont déphasés (chacun à son tour passe par un minimum). Le champ magnétique résultant tourne à la même fréquence que le courant, soit 50 Hertz. Les trois enroulements statoriques créent donc un champ magnétique tournant, sa fréquence de rotation est nommée fréquence de synchronisme [6].

Le rotor est constitué de barres d'aluminium noyées dans un circuit magnétique. Ces barres sont reliées à leurs extrémités par deux anneaux conducteurs et constituent une cage d'écureuil (Figure II. 6). Cette cage est en fait un bobinage à grosse section et très faible résistance.

La cage est balayée par le champ magnétique tournant, les conducteurs sont alors traversés par des courants de Foucault induits. Des courants circulent dans les anneaux formés par la cage, les forces de Laplace qui en résultent exercent un couple sur le rotor. D'après la loi de Lenz, les courants induits s'opposent par leurs effets à la cause qui leur a donné naissance [10].

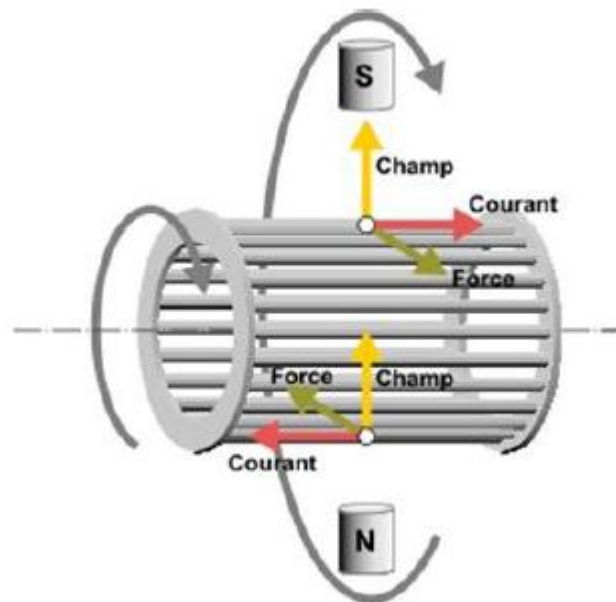


Figure II.5. Variation et orientation du champ tournant dans une machine asynchrone

Le rotor tourne alors dans le même sens que le champ, mais à une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme de ce dernier. Le rotor ne peut pas tourner à la même vitesse que le champ magnétique, si non la cage ne serait plus balayée par le champ tournant et il y aurait disparition des courants induits et donc des forces de Laplace et du couple moteur. Les deux fréquences de rotation ne peuvent donc pas être synchrones d'où le nom de moteur asynchrone.

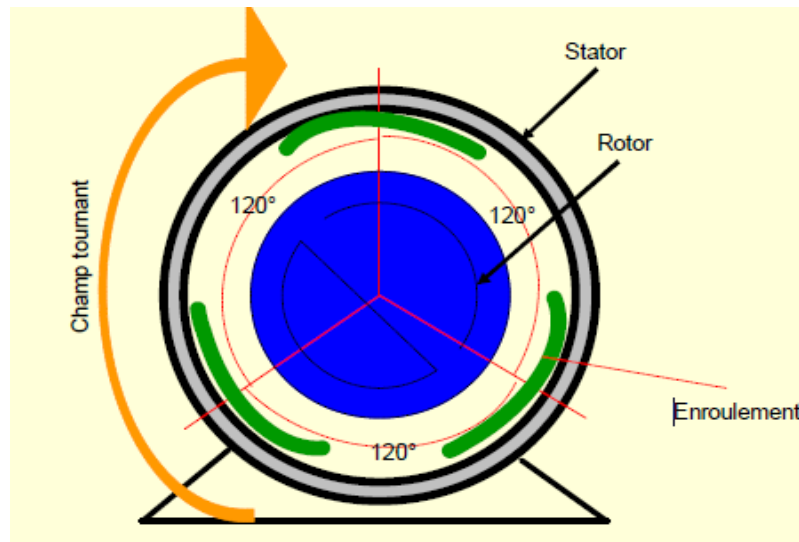


Figure II.6. Variation et orientation du champ tournant avec les angles dans une machine asynchrone

II.5. Bobinage de la machine asynchrone

On peut effectuer le bobinage d'une machine asynchrone de plusieurs façon, la Disposition des bobines dans les encoches différenties ces types d'enroulements d'où On trouve habituellement trois types : l'enroulement imbriqué, concentrique et Ondulé.

Chaque type présente des avantages dans certaines applications. L'enroulement du stator peut être à une seule couche ou à deux couches, ce dernier nous permet de raccourcir le pas d'enroulement. Le bobinage statorique peut se décomposer 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 à l'origine de la conversion électromagnétique [11].

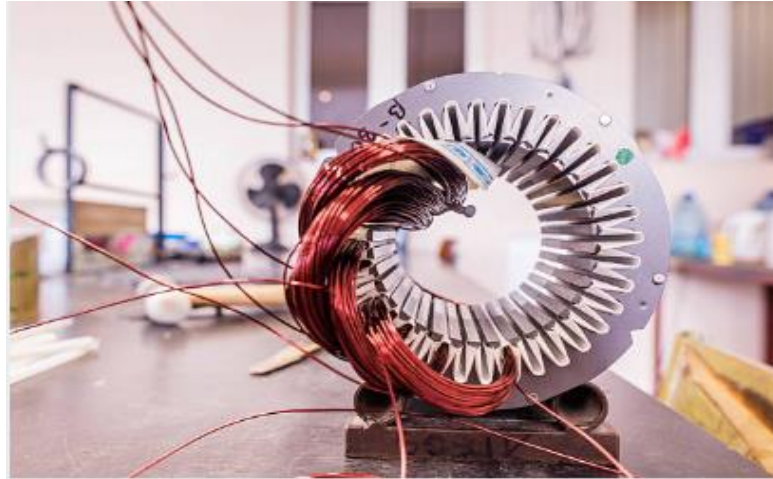


Figure II.7.Bobinage d'une machine électrique

II.6. Les différents types d'enroulements

On distingue trois types de bobinage: concentrique, imbriqué et ondulé. L'enroulement concentrique (figure II.9) est un bobinage à une seule couche, son utilisation est favorable dans les machines à faible et moyenne puissance, tant dit que l'imbriqué (figure II.10) est beaucoup employé dans les gros moteurs, alors que l'ondulé (figure. II.11), son utilisation est limitée dans les rotors. Les enroulements imbriqué et ondulé peuvent être à simple ou double couche, dans le cas de la configuration double couches, le nombre de conducteurs est très souvent pair [12].

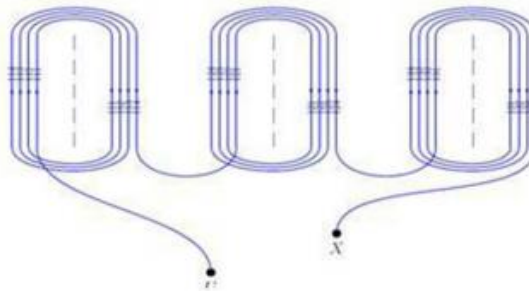


Figure II.8.Schéma d'un enroulement concentrique

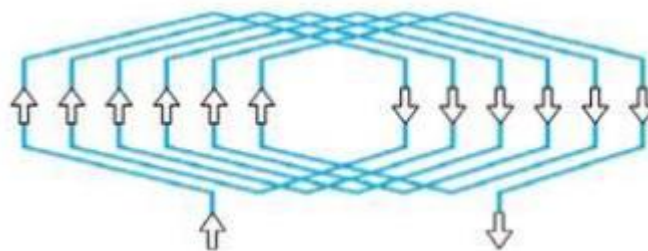


Figure II. 9. Schéma d'un enroulement imbriqué

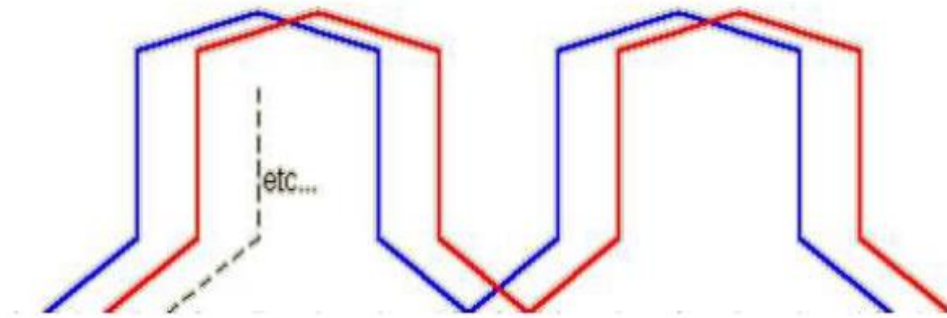


Figure II.10. Schéma d'un enroulement ondulé

Il est possible de relier en série toutes les bobines d'une phase, le moteur ne marchera dans ce cas qu'avec une seule tension. Par contre si on veut avoir un moteur à plusieurs tensions, la répartition des bobines sera divisée sous plusieurs groupes de bobines en parallèle comme dans la (figure II.11).

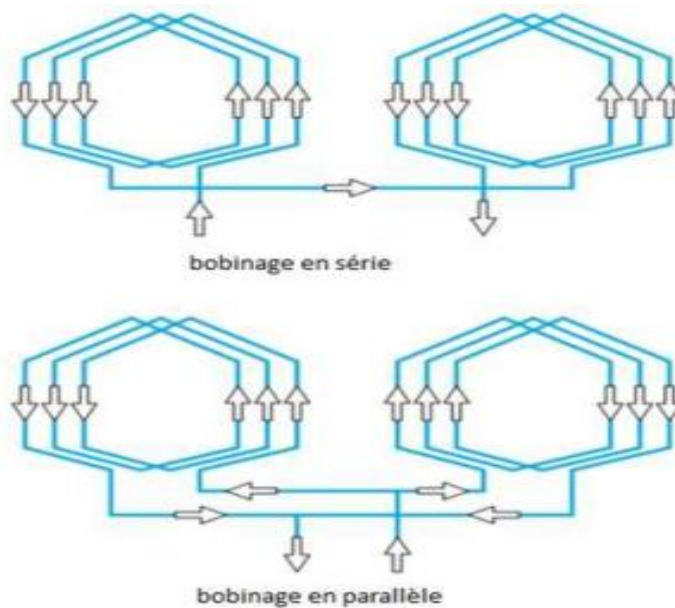


Figure II.11. Bobinages multipolaires

II.7. Matériaux dans les machines électriques

Les machines électriques comportent essentiellement 04 types de matériaux jouant un rôle important dans la conversion électromagnétique de l'énergie.

- Des matériaux magnétiques pour canaliser le flux magnétique ;
- Des matériaux conducteurs pour conduire les courants électriques ;
- Des isolants ;
- Des organes mécaniques.

Il est toujours nécessaire, dans toute conception de produit industriel, de choisir le matériau dans lequel l'objet sera réalisé et le procédé utilisé pour sa réalisation. Ce choix est à la fois crucial et difficile. Crucial car de lui dépend la performance de la conception et sa viabilité économique, difficile en raison à la fois de la diversité des matériaux et des procédés possibles, et de la variété des requêtes exigées par la conception [13].

II.7.1. Matériaux magnétiques

Sous l'action d'un champ d'excitation magnétique \vec{H} extérieur, les matériaux magnétiques sont le siège d'une induction locale \vec{B} , qui est la résultante de l'aimantation du matériau et du champ appliqué :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M} \quad (\text{II.1})$$

$\mu_0 \vec{H}$: L'induction d'un matériau

\vec{M} : L'aimantation locale du matériau

On distingue les matériaux magnétiques doux et les matériaux magnétiques durs, tous deux utilisés dans la fabrication de machines électriques :

- Un matériau magnétique doux est caractérisé par une perméabilité relative élevée et un champ coercitif faible. On l'utilise notamment comme conducteur de flux pour transmettre une information ou convertir de l'énergie.

Tableau II.1. Caractéristiques de quelques matériaux magnétiques

Matériau	Composition (%)	Perméabilité relative initiale en (10^3)	Perméabilité relative maximale en (10^3)	Champ coercitif (A/m)
Fer pur	0.05 (impureté)	10	200	4
Fe Si (orienté)	97Fe 3Si	1.5	40	8
78 Permalloy	78.5 Ni 21.5Fe	8	100	4
Supermalloy	5Mo 79Ni 16Fe	100	1000	0.16
Mumétal	5Cu 2Cr 77Ni 16Fe	20	100	4
Permondur	50Fe 50Co	0.5	5	160
Amorphe	40Fe 40Ni 14P 6B	≈ 5	≈ 5	≈ 0.8

- Par contre, un matériau magnétique dur est caractérisé par une perméabilité relative faible ($\mu_r \approx 1$) et un champ coercitif élevé [14].

Les termes $\mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$ et J sont alors du même ordre de grandeur, le matériau ferromagnétique dur est une source de flux, ou un aimant.

Tableau II. 2.Caractéristiques de Quelques Matériaux Magnétiques Durs (aimants)

Matériau	Composition (%)	Induction rémanente (T)	Champ coercitif (A/m)
Alnico à cristallisation dirigée	8Al 14Ni 24Co 3Cu51Fe	1.3	63.3
Poudre de fer	100Fe	0.6	38
Cobalt platine	50Co 50Pt	0.68	340
Samarium cobalt	50Sm 50Co	0.9	716

Pour réduire les pertes par hystérésis, les métallurgistes soumettent les tôles, qui serviront à confectionner les circuits magnétiques, à des cycles de laminage à des températures très précises. Le but étant d'obtenir des cycles d'hystérésis très étroits et d'orienter les domaines magnétiques (domaine de Weiss) afin d'obtenir une direction où la réluctance est minimale [13].

Les pertes par hystérésis étant fonction de la surface du cycle (et de la fréquence) on les diminue ainsi considérablement. Les rouleaux de tôles sont découpés par emboutissage en considérant l'axe de laminage indiqué par le métallurgiste.

Le fabricant de tôles soumet celles-ci à des essais et indique les pertes en W/kg pour telle fréquence et tel champ magnétique maximum. On utilise par exemple :

- Des tôles au silicium : alliage de fer et de 3,4 % de silicium, saturée à 2 T, $\mu_r = 6500$
- Des tôles spéciales à grains orientés, saturées à 3 T, $\mu_r = 35000$.

II.7.2. Matériaux conducteurs

Pour le bon fonctionnement d'une machine, le choix d'un conducteur pour réaliser le circuit électrique est très important. Les bobines électromagnétiques de la plupart des dispositifs électromagnétiques typiques sont élaborées avec du fil en cuivre [6].

Le fil de bobinage en cuivre est disponible avec différents types d'isolation pour un fonctionnement jusqu'à une température maximale de 240 °C (Poly imide). Le cuivre est généralement utilisé pour réaliser les bobinages des machines électriques car, à part l'argent, c'est le matériau dont la résistivité est la plus faible.

Le paramètre important qui influence directement les performances du conducteur et donc les performances des moteurs, est l'évolution de la résistance du conducteur en fonction de la température [6].

Par exemple, une réduction de la température de 10 °C dans un moteur réduit les pertes Joule de 3 à 4%. La résistance du conducteur dépend fortement de la température et augmente linéairement avec celle-ci. La résistivité d'un métal change de façon complexe, approximée souvent par l'équation suivante valable entre 20 et 1600°C.

$$\rho(T) = \rho_0(t + \alpha\Delta T) \quad (\text{II.2})$$

Où $\Delta T = T - T_0$, ρ et α sont respectivement la résistivité à la température ambiante T_0 , et les coefficients en fonction de la température [15].

Tableau II.3.Caractéristiques de Quelques Matériaux conducteurs Résistivité à 20°Celsius

Matériaux	ρ_0 en 10^{-8} $\Omega \cdot m$	A	
		Valeur minimale	Valeur maximale
Cuivre	1,72	3,6	4,3
Or	2,04	3,4	3,71
Aluminium	2,63	3,7	4,3
Argent	1,59	3,6	6,1
Laiton	7,0	1,0	1,5

II.8. Isolation du bobinage

Les conducteurs sont isolés avec du papier, du coton, du bois, du PVC (polychlorure de vinyle), du caoutchouc, des thermoplastiques... Une fois la machine construite, on l'étuve afin de supprimer l'humidité puis on l'imprègne avec des vernis ou des résines, suit éventuellement une phase de cuisson. Les différents isolants répondent à un cahier des charges incluant la valeur de la tension électrique à supporter, la température de fonctionnement, les contraintes fonctionnelles et d'agencement de l'isolant dans la machine. Tous les facteurs de vieillissement thermique, électrique, mécanique et environnementaux ont un impact sur la durée de vie de tout type de machine, mais l'importance de l'un vis-à-vis des autres varie avec le type de machine et les conditions d'utilisation. C'est la qualité de ses isolants qui fait la qualité d'une machine. C'est par vieillissement puis destruction par claquage (amorçage d'un arc à travers l'isolant) que prend fin la vie d'une machine électrique.

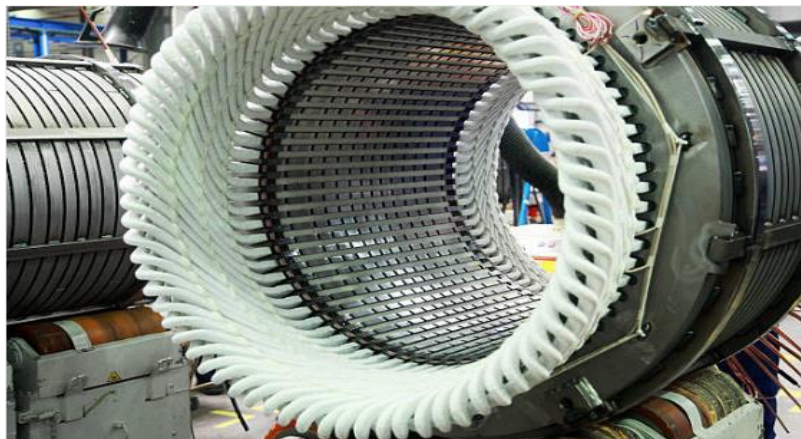


Figure II.12. Image d'une isolation des'encoches

L'isolation entre les conducteurs, les bobines entre elles et le circuit magnétique peut s'effectuer à l'aide de plusieurs types de matériaux isolants, tels que le coton, la soie, le papier et autre matériaux similaires parfois imprégnés d'huile. On utilise aussi des matières inorganiques comme le mica, la fibre de verre, utilisés seules ou agglomérés à l'aide de produits tels que l'asphalte, la gomme et les résines synthétiques.

Les développements dans le domaine de la chimie ont amené toute une gamme de matériaux synthétiques, parmi eux le polyvinyle, le polyuréthane, le nylon, l'époxy et le polyester qui ont des caractéristiques isolantes et thermiques spécifiques. Pour l'isolation des fils on utilise des vernis. La (Figure II. 16) présente les différentes isolations existantes dans une encoche [10].

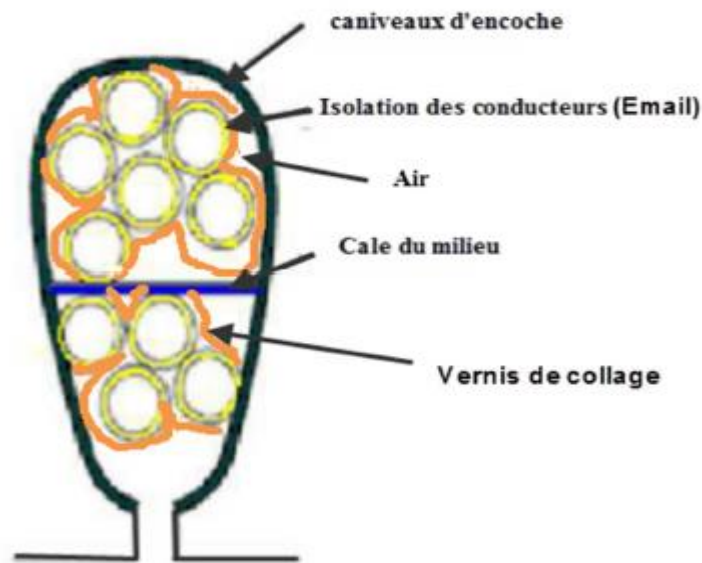


Figure II.13. Différentes isolations dans l'encoche

La détermination de la capacité d'une machine à supporter un fonctionnement en régime permanent sous l'effet de la température est donc primordial. Cette grandeur est définie comme étant sa classe thermique ou classe d'isolation. Dans notre cas, la classe d'isolation définira la température maximale de fonctionnement des bobinages.

Les trois classes les plus utilisées et définies par les normes CEI 85 et CEI 34-1 (Commission Electrotechnique Internationale) ont été reportées dans le tableau ci-après ; elles fixent les valeurs limites de l'échauffement et de la température des bobinages (au point le plus chaud).

La classe la plus courante est la classe F comme l'indique le tableau II.4 [6].

Les matériaux d'isolants utilisés entre conducteurs sont le papier, coton et amiante, et pour les conducteurs de faible section, on fait émaillage (couche de protection) ; Et entre conducteur et masse, on utilise les cartons, toiles huilées et tissus des verres imprégnés de vernis de silicone [11].

Tableau II.4.Classification des Matériaux d'Isolants

Classe	T° max (°C)	Matériaux
Y	90	Coton, soie, papier et matière organique similaire sans imprégnation, ni immersion dans un diélectrique liquide
A	105	Les même matières mais imprégnées et immergées dans un diélectrique liquide tel que l'huile
E	120	Emaux au résines époxydes ou formol polyvinyle et textile imprégnés de certains plastiques
B	130	Matière minérale tel que mica fibre de verre aiment avec matière d'agglomération convenable (vernix)
F	155	Même matière mais avec autre agglomération (résines alkyles, époxydes, polyesters)
H	180	Elastomères de silicones ou mica, ^fibre de verre amiantes agglomérées avec résine de silicone
C	>180	Mica sans agglomérant, porcelaine, quartz, verre

II.9. Les pertes dans les machines électriques

Sont nombreuses et d'origines différentes. Elles peuvent être regroupées en quatre grandes catégories :

- ❖ Pertes dans le circuit électrique.
- ❖ Pertes dans le circuit magnétique.
- ❖ Pertes mécanique.
- ❖ Pertes supplémentaires.

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

II.9.1. 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 [16].

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)

$$P_j = RI^2 \quad (\text{II-4})$$

Avec

R : Résistance du conducteur [Ω].

I : courant traversant le conducteur [A].

La résistance R dépend de la température selon la loi :

$$R = R_0 (1 + \alpha (T - T_0)) \quad (\text{II.5})$$

Avec :

R_0 : Résistance à la température de référence T_0 [Ω]

T : Température de conducteur [$^{\circ}C$]

α : Coefficient caractéristique du matériau, $\alpha = 0.00427$ dans le cas du cuivre.

II.9.2. Les pertes dans le circuit magnétique

Elles sont appelées aussi pertes dans le fer du fait que les matériaux utilisés par ce circuit sont, habituellement, à base de fer. Elles représentent l'énergie consommée à cause de la présence du champ magnétique variable dans le circuit magnétique. Ces pertes ne dépendent 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 exige une bonne connaissance des mécanismes physiques responsables de la magnétisation du matériau et de la dissipation d'énergie associée [6].

Les pertes fer sont le résultat de deux phénomènes physique : les pertes par hystérésis et les pertes par courant de Foucault.

II.9.2.1 Pertes par hystérésis

Ces pertes proviennent d'un phénomène d'hystérésis du champ magnétique du matériau utilisé. En effet, l'état de ce dernier dépend non seulement de la sollicitation présente (magnétisation ou démagnétisation du matériau) mais aussi de l'état précédent du champ magnétique. Elles apparues par l'utilisation des matériaux magnétique dans les machines électriques qui sont proportionnelles à la caractéristique d'hystérésis du matériau [17]. Ces pertes dépendent de la nature du matériau, de son volume, de son champ magnétique B et de la fréquence f.

Les pertes par hystérésis pour un volume V de matériau soumis localement aux champs H et B peuvent se mettre sous la forme :

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{\max} \quad (\text{II-6})$$

Avec :

P_h : pertes par hystérésis [W/Kg]

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

f : fréquence [Hz]

B_{\max} : induction maximale [T]

Lorsqu'on fait circuler régulièrement le champ magnétisant entre deux limites fixes, on constate qu'après une dizaine de cycles, l'induction finit par évoluer, elle aussi entre deux limites stables. L'ensemble décrit une courbe fermée appelée : Cycle d'hystérésis.

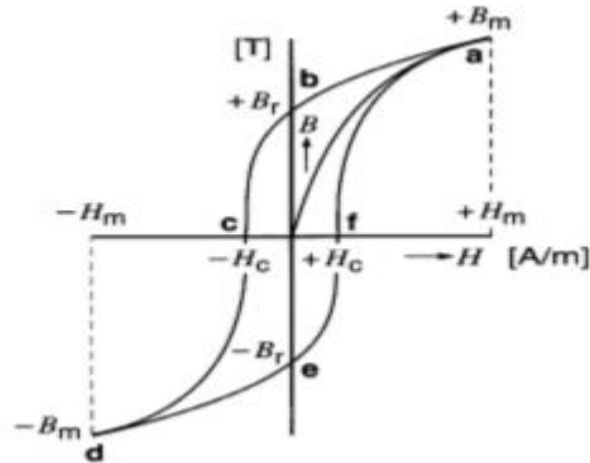


Figure. II.14. Cycle d'hystérésis d'un matériau magnétique [6]

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

II.9.2.2. Pertes par courant de Foucault

Les Pertes par courants de Foucault correspondent aux pertes ohmiques issues des courants induits dans les matériaux ferromagnétiques. Ces courants ont pour origine les variations cycliques du champ magnétique dans le fer (figure. II.15). Pour une masse donnée elles sont proportionnelles au carré de l'induction, de la fréquence ainsi que de l'épaisseur des tôles qui forment le circuit magnétique statorique.

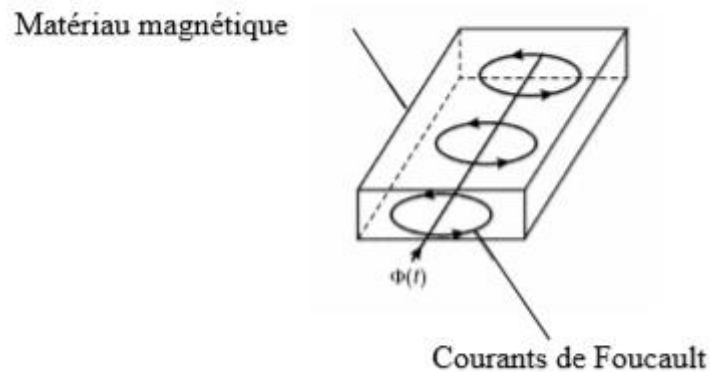


Figure. II.15. Courant de Foucault dans le matériau magnétique.

Ces pertes dépendent de l'amplitude de l'induction, de la fréquence (f), et de la résistivité interne du matériau magnétique (ρ). Les pertes par courant de Foucault se calculent de la manière suivant:

$$P_f = K_f \frac{f^2 B^2}{\rho} \quad (\text{II- 7})$$

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

II.9.3. Pertes mécaniques

Les pertes mécaniques sont de multiples origines, et prennent en compte tous les frottements dus à la rotation de la partie tournante de la machine, que ce soit des frottements entre solides ou entre solides et fluides [18]. On trouve essentiellement :

II.9.3.1. Les pertes par frottement dans les roulements

Ces pertes sont dues au contact 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, barbotage ou injection d'huile), viscosité et type de géométrie du roulement [19].

II.9.3.2. 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 utilisé pour le refroidissement de la machine.

II.9.4. Les pertes supplémentaires

Ce sont des pertes dues à tous les phénomènes secondaires :

- conducteurs :
 - par effet de peau
 - flux de fuites d'encoches et des têtes de bobines
 - harmoniques d'espace dues aux discontinuités géométriques ($z_{1,2}$ $m_{1,2}$: fini)
 - inclinaison d'encoches et le contact entre les barres et la tôle (courant inter-barres)

➤ tôle :

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

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

$$P_{\text{supp}} = P_{\text{tot}} - (P_f + P_{\text{mec}} + P_{\text{js}} + P_{\text{jr}}) \quad (\text{II-8})$$

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].

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

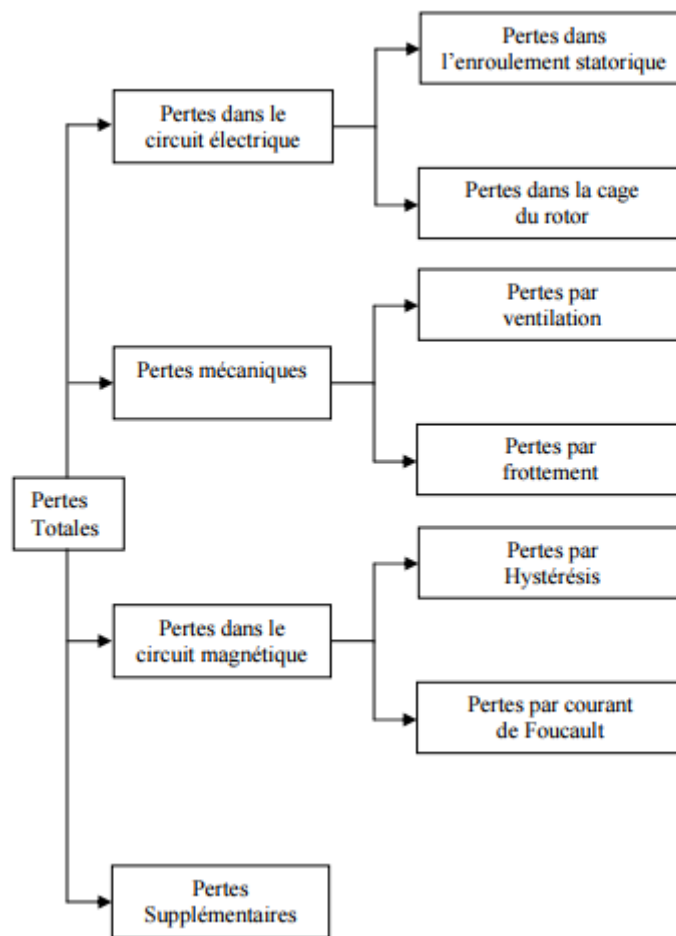


Figure.II.16. Différentes pertes dans une machine asynchrone.

II.10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons établies une description de la machine asynchrone et sa structure. La machine asynchrone qui fait actuellement l'objet d'un intérêt accru dans plusieurs applications, ceci étant dû essentiellement à sa fiabilité, son coût relativement faible, sa robustesse et sa simplicité de construction. Cependant, des travaux sont toujours en cours pour améliorer son rendement et réduire les pertes par échauffement.

Dans ce qui suit nous allons présenter la modélisation magnétothermique des moteurs asynchrones en vue de la modélisation numérique d'un moteur de l'entreprise Electro-Industries.

Chapitre III

Modélisation numérique du couplage magnétothermique dans un moteur asynchrone

III.1.Introduction

Le développement de la conception des moteurs électriques s'appuie sur, outre l'expérimentation toujours nécessaire, des modèles capables de prédire le fonctionnement des prototypes en cours de conception. Pour mettre en œuvre ces modèles, il est généralement nécessaire de passer par la résolution d'équations différentielles aux dérivées partielles, qui permettent de décrire des phénomènes physiques et donc d'aboutir à une connaissance des répartitions spatiales et temporelles de grandeurs électromagnétiques et thermiques.

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 au départ exclusivement réalisée avec des méthodes analytiques, donnant seulement des grandeurs globales avec beaucoup d'hypothèses simplificatrices. La méthode des éléments finis a connu un développement considérable 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. L'efficacité de cette méthode réside dans la précision des résultats.

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

Nous considérons un système composé d'air, de matériaux ferromagnétiques et conducteurs. L'ensemble du système forme le domaine d'étude Ω de frontière Γ et les milieux conducteurs forment le domaine Ω_c avec $\Omega_c \subset \Omega$ Figure(III.1).

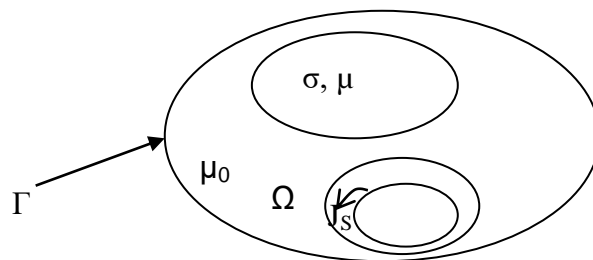


Figure III.1.Domaine d'étude

L'ensemble des phénomènes électromagnétiques est régi par les équations de Maxwell. Celles-ci constituent un système d'équations aux dérivées partielles qui lient les phénomènes magnétiques aux phénomènes électriques [20].

- **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:**

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

L'équation (III.4) est une généralisation de la loi d'Ampère, i.e. $\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}$. Elle constitue avec (III.2) les équations dites de couplage électromagnétique, alors que les équations (III.1) et (III.3) constituent des équations dites de conservation.

Les deux types de champs de vecteurs sont liés par les relations constitutives, dites lois de comportement, décrivant les caractéristiques des matériaux. Sans elles, le système (III.2-2.4) serait indéterminé. Elles sont données généralement sous les formes suivantes :

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

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

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

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. Formulation magnétodynamique

III. 3. 1. Introduction des potentiels

La résolution des équations de Maxwell peut être obtenue en considérant les champs comme inconnues. Cependant, on préfère souvent exprimer les champs électrique et magnétique en fonction de potentiels. En effet, M. Feliachi a montré que le système obtenu en prenant comme inconnues les champs (\vec{E}, \vec{H}) converge moins bien que si on travaille avec des potentiels [16].

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 [16].

Différentes formulations électromagnétiques ont été élaborées dans la littérature, en exprimant les champs de vecteurs \vec{E} , \vec{B} , \vec{H} et \vec{J} en fonction de nouvelles variables, telles que les potentiels vecteurs magnétique \vec{A} et électrique \vec{T} ou des potentiels scalaires électrique V et magnétiques et réduits Φ_r , d'autres formulations sont obtenues exprimant sous d'autres formes les équations de Maxwell, et dont la résolution conduit aux diverses grandeurs locales ou globales du problème [21].

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 :

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{E} \right) + \sigma \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) = 0 \quad (\text{III.10})$$

Elle nécessite l'utilisation 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 vecteur [21].

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. Cependant il faut assurer la continuité de la composante normale de l'induction magnétique, soit en terme 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 [21].

III. 3. 4. Formulation électrique $\vec{A} - V$

Ce modèle de formulation utilise le potentiel vecteur magnétique \vec{A} dans tout le domaine incluant les régions conductrices et non conductrices et le potentiel scalaire électrique uniquement dans les régions conductrices [21].

En reprenant l'équation (III. 3), on peut montrer 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 :

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

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

III. 4. Les équations des machines asynchrone à cage pour différents régions

➤ **Au niveau feuille statoriques**

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

➤ **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**

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

➤ **Au niveau des barres rotoriques**

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

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), c'est une expression générale qui donne la densité des pertes à tout instant de l'évolution du phénomène électromagnétique quel que soit leur régime de variation du courant [22].

Dans pratique, dans beaucoup de phénomènes électromagnétiques nous pouvons considérer que le régime de variation est sinusoïdale. Pour une pulsation ω donnée, le potentiel vecteur varie en fonction du temps, de la façon suivant :

$$A=A_m \sin \omega t \quad (III.27)$$

Où:

A_m : est l'amplitude du potentiel vecteur A.

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

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

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:

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

Où:

A^* est la valeur complexe conjuguée de A.

III.6.Phénomènes thermiques

La modélisation des phénomènes de génération et de transfert de chaleur dans une machine électrique est une étape primordiale, en particulier dans sa phase de conception. Cette modélisation thermique peut se baser sur deux principes, le premier analytique en utilisant un circuit à constantes localisées et le deuxième intégrant les méthodes numériques. Dans les deux cas, la précision du modèle thermique dépend de certains paramètres critiques et difficiles à évaluer [22].

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

III.7.1. Échange de chaleur par conduction

III.7.1.1 Loi de Fourier

Ce mode de transfert de chaleur opère dans la machine électrique dans l'ensemble des parties solides de celle-ci. En effet, lors de la présence d'un gradient de température dans ces milieux, le flux thermique transite du milieu le plus chaud vers le milieu le plus froid [23].

La loi de Fourier donne la relation entre le vecteur densité de flux thermique \vec{q} , le gradient de température $\overrightarrow{grad} T$ et la conductivité thermique λ du milieu par la formule suivante :

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

Le signe négatif dans cette loi est introduit pour respecter la seconde loi de la thermodynamique qui annonce que la chaleur se diffuse des régions chaudes de hautes températures vers des régions froides.

III.7.2.Équation de conduction de la chaleur

En réalisant un bilan d'énergie entre la chaleur produite à l'intérieur d'un volume V, celle qui induit la variation de sa température et celle échangée à ses frontières, l'équation de la chaleur dans un milieu anisotrope est de la forme suivante [25] :

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

Avec :

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

ρ masse volumique (Kg/m³),

λ conductivité thermique (W/m.°C),

ρc capacité thermique volumique (J/m³.°C),

q production volumique de chaleur (W/m³).

III.7.3.Conductivité des matériaux

La conductivité est une des propriétés thermo physiques d'un matériau homogène et isotrope. Elle dépend principalement du type de ce matériau et de sa température. La figure (III.2.) montre la plage de variation de cette conductivité pour différents états de la matière à des températures et des pressions de référence [25].

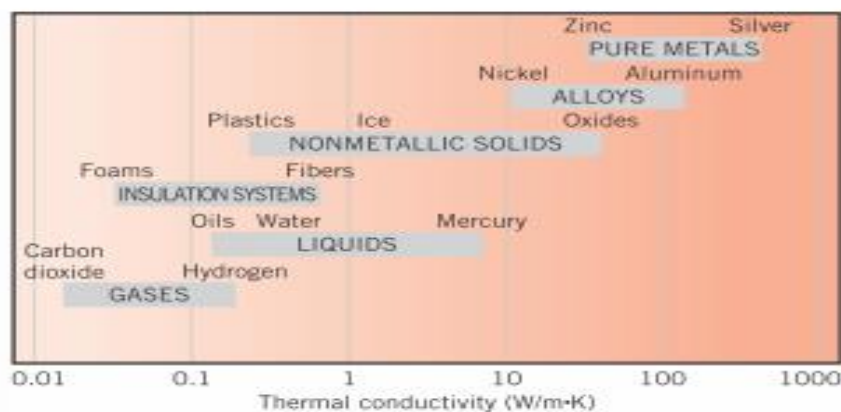


Figure III.2.conductivité thermique en fonction de la température

III.7.4.Échange de chaleur par convection

Ce mode de transmission de chaleur prend place entre un fluide en mouvement et une surface solide à des températures différentes. La convection peut se classer selon l'origine du mouvement du fluide : la convection naturelle et la convection forcée ou la convection mixte (naturelle+forcée).

La convection naturelle reste de la conduction dans un fluide déformable où les gradients de masse volumique sont le terme moteur de l'écoulement du fluide. Alors que la convection forcée est réalisée en présence d'une force externe qui induit le mouvement des molécules d'air comme les ventilateurs à titre d'exemple. Dans les deux cas, la quantité de flux de chaleur transmise q est évaluée par la loi de Newton :

$$q = h.S.(T_s - T_\infty) \quad (\text{III.32})$$

Avec :

h : coefficient d'échange convectif ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)

T_s : température de surface du solide ($^\circ\text{C}$)

T_∞ : température du fluide à l'infini ($^\circ\text{C}$)

S : surface de contact solide-fluide (m^2)

En général, la caractérisation des échanges convectifs est réalisée en évaluant le coefficient d'échange h . Ce dernier dépend principalement de la configuration géométrique du problème, du régime d'écoulement, de la vitesse et des propriétés thermo physiques du fluide. Les ordres de grandeur des coefficients d'échange convectif h sont présentés dans le par des intervalles de variation selon la nature et le fluide de convection [25].

Tableau III.1.les coefficients échanges convectifs dans chaque mode de convection et de fluide.

Mode de convection et fluide	Coefficient d'échange convectif h
Air, Convection naturelle	6-30
Air, Convection forcée	30-300
Huile, Convection forcée	60-1800
Eau, Convection forcée	300-18 000
Eau, à l'ébullition	3 000-60 000
Vapeur, Condensée	6 000-120 000

III.7.5.Échange de chaleur par rayonnement

Ce mode décrit le transfert qui se fait par rayonnement électromagnétique. En effet, tout corps, quelque soit sa température, émet des radiations électromagnétiques. Ce mode contribue à l'évacuation des calories produites à l'intérieur de la machine ainsi que le transfert de chaleur entre ses différentes zones. En général, l'évaluation du flux perdu par une surface grise S à une température T_s vers l'air ambiant à une température T_∞ dépend du facteur d'émissivité ε de la surface. Ce flux est calculé par la formule suivante :

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

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 [25].

III.7.6.Couplage magnétothermique Equations couplée

Les deux phénomènes physiques (thermiques et électromagnétiques) sont généralement liés dans les dispositifs électromagnétiques. Les sources de chaleur sont les pertes Joules provoquées par la circulation de courants, donc les phénomènes thermiques dépendent des phénomènes électromagnétiques. Inversement, les propriétés électromagnétiques (conductivité électrique et perméabilité magnétique) varient avec la température, donc les phénomènes électromagnétiques sont imposés à ceux thermiques [26].

L'étude des phénomènes électromagnétiques et thermiques implique l'analyse à la fois électromagnétique et thermique. Elle consiste à résoudre un système d'équations magnétothermique composé de l'équation électromagnétique et l'équation thermique, qui s'écrit comme suit:

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) + \sigma \left(+ \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = \vec{J}_s \\ \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = q + \text{div}(\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T) \end{cases} \quad (\text{III.34})$$

III.8.Méthodes de modélisation

Les outils de modélisation thermique d'une machine électrique se basent sur deux approches : l'approche analytique ou l'approche numérique. L'avantage principal de l'approche analytique est son temps de calcul relativement faible et la possibilité d'intégration dans des

approches systèmes. Cependant, le développeur du modèle doit investir un effort important pour la définition du circuit qui modélise au mieux le modèle électromagnétique et le transfert de chaleur dans la machine. Les géométries complexes sont également difficiles à traiter. En revanche, les méthodes numériques donnent la possibilité d'étudier de telles géométries et d'ouvrir des informations locales sur les paramètres électromagnétiques et thermiques en chaque point de la machine. Ces méthodes permettent également le couplage avec des problèmes physiques diverses tels que le magnétique-mécanique ou le magnétothermique. Cependant, ces méthodes sont onéreuses en temps de calcul et de création des modèles. Deux types d'analyse numérique existent pour le traitement des problèmes magnétothermique :

La mécanique des fluides numériques (CFD : Computation a la Fluide Dynamics) et la méthode des éléments finis (ou FEA : Finite Element Analysis). La méthode des éléments finis permet de modéliser le transfert de chaleur par conduction dans les zones solides de la machine, en particulier dans les zones hétérogènes. Pour les zones de contact fluide-solide, les corrélations analytiques et empiriques des coefficients de convection (tableau.III.1) sont utilisées [27].

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

Cette méthode est généralement utilisée pour les modélisations électromagnétiques, cependant certains logiciels, qui réalisent de telles modélisations, intègrent un module thermique [Flux, Infolytica ou motor-cad]. L'avantage de l'utilisation de la FEA sur la méthode analytique est la possibilité de déterminer la distribution des températures locales avec une grande précision dans les différentes zones de la machine ; en particulier dans l'encoche où le gradient de température peut être important. Cette méthode permet également la détermination de la conductivité équivalente du bobinage. Dans ce cas, l'intérêt de l'utilisation de la méthode MEF est de prendre en compte une meilleure distribution des pertes ; en conséquence une meilleure estimation des températures [28].

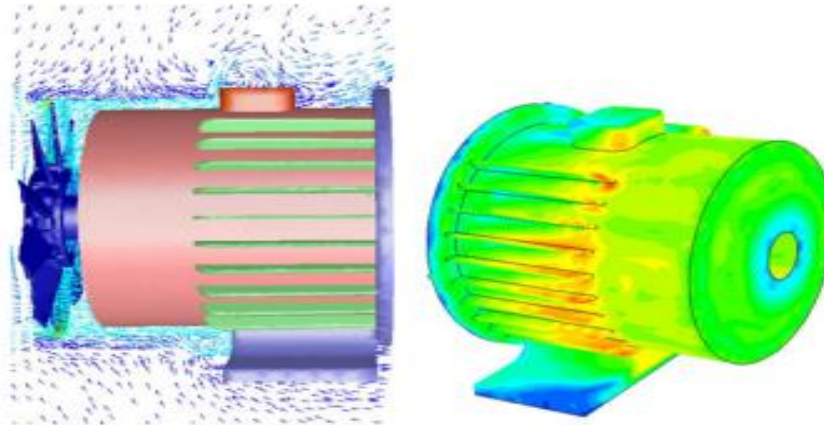


Figure.III.3. Distribution de l'air et de la température autour de la carcasse d'un moteur électrique

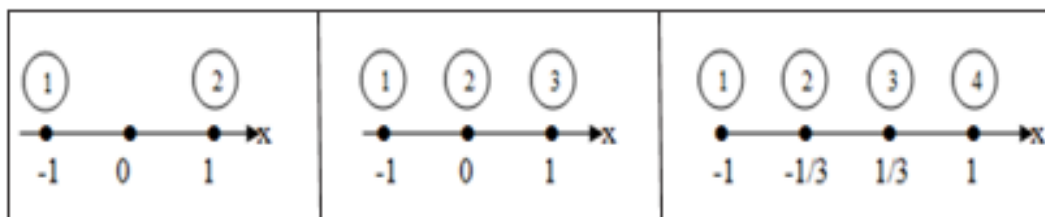
III.9.1.La discrétisation

L'approche de base de la méthode des éléments finis est de subdiviser le domaine d'étude en un nombre finis de sous domaines appelés éléments. L'approximation de l'inconnue se fait en chaque élément à l'aide des fonctions d'interpolation. La fonction d'interpolation est aussi définie en fonction de la géométrie de l'élément qu'on choisit préalablement et coïncide avec les nœuds de cet élément relatifs aux valeurs de l'inconnue. On parle alors d'interpolation nodale [20].

Pour des domaines d'étude à une, deux ou trois dimensions, des éléments classiques peuvent être définis selon le degré de la courbe d'interpolation qui lui est associée. On rencontre généralement, des éléments linéaires, quadratiques ou cubiques.

Nous présentons dans ce qui suit quelques éléments :

- **Éléments à une dimension**



- Linéaire (2 nœuds)

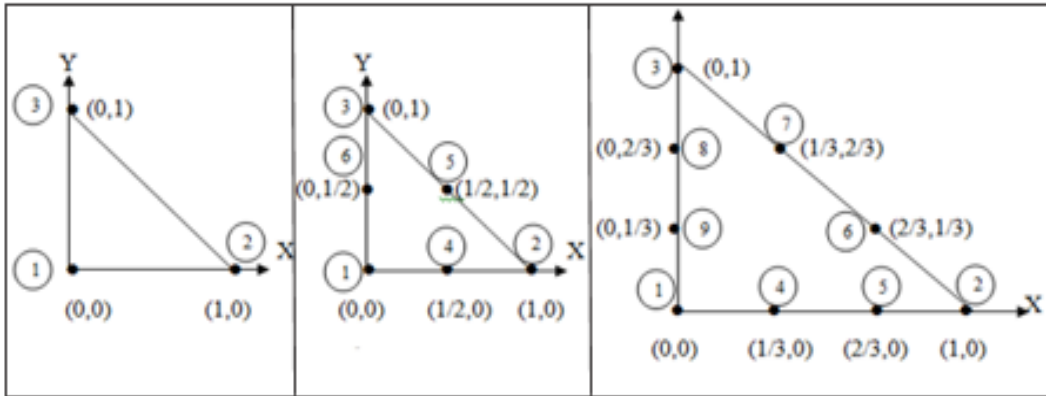
- Quadratique (3 nœuds)

- Cubique (4 nœuds)

Figure. III.4. Élément à une dimension.

- **Éléments à deux dimensions**

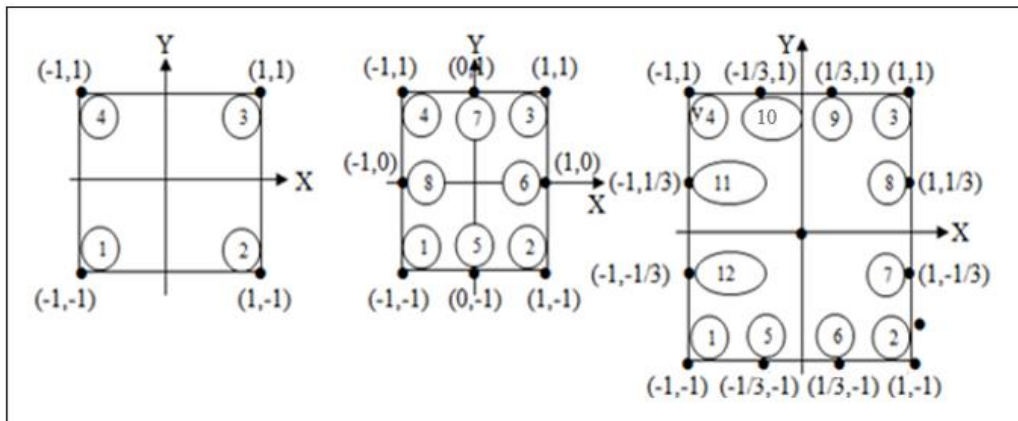
- Éléments triangulaires



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

Figure. III.5. Élément triangulaire à deux dimensions.

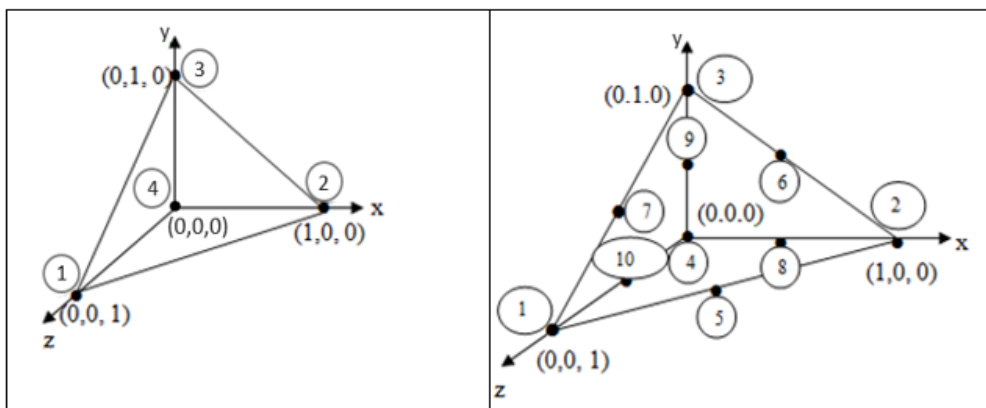
○ Éléments carrés



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

Figure. III. 6. Élément carré à deux dimensions.

○ Éléments à trois dimensions



- Linéaire (4 nœuds) - Quadratique (10 nœuds)

Figure. III.7. Éléments à trois dimensions.

III.10.Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation des phénomènes magnétothermique dans les machines électriques. Nous avons donné un aperçu sur la modélisation électromagnétique puis sur la modélisation thermique et conclu par les méthodes de résolution pour l'obtention des différents champs dans la machine.

Chapitre IV

Applications et

résultats

IV. 1. Introduction

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes les plus utilisées pour résoudre des équations différentielles à dérivées partielles issues de la modélisation électromagnétique et ainsi que de la modélisation thermique.

Nous nous engageons dans un calcul par éléments finis d'un moteur de moyenne puissance de l'ordre de 45 kW à cage d'écureuil. Les caractéristiques magnétodynamiques et thermiques sont obtenues grâce à des simulations réalisées sous l'environnement Ansys-Motor-CAD.

IV. 2. Présentation de la machine

La machine étudiée est une machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil, de puissance de 45 kW bipolaire, fabriquée par l'entreprise Electro-Industries de d'Azazga. Les paramètres géométriques et physiques de la machines sont donnés par le tableau (IV. 1).

Tableau IV. 1 : Cahier de charges de la machine étudiée.

Paramètres	symbole	Valeur	Unité
Puissance nominale	P_N	45	KW
Tension nominale	U_N	380	V
Courant nominal	I_N	83	A
Couple nominal	C_N	147	N.m
Vitesse de rotation nominale	N_N	2960	Tr/min
La fréquence	f	50	Hz
Nombre de phase	m_1	3	-
Nombre du pôle	$2p$	2	-
Couplage électrique	-	Δ	-
Classe d'isolation	-	F(155°C°)	-



(a) Le Rotor de moteur



(b) le stator placée dans la carcasse



(c) Le coté de ventilation



(d) coté de travail.



(e) Vue du moteur monté.

Figure IV.1. Moteur asynchrone à cage d'écureuil 45 kW

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

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

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

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

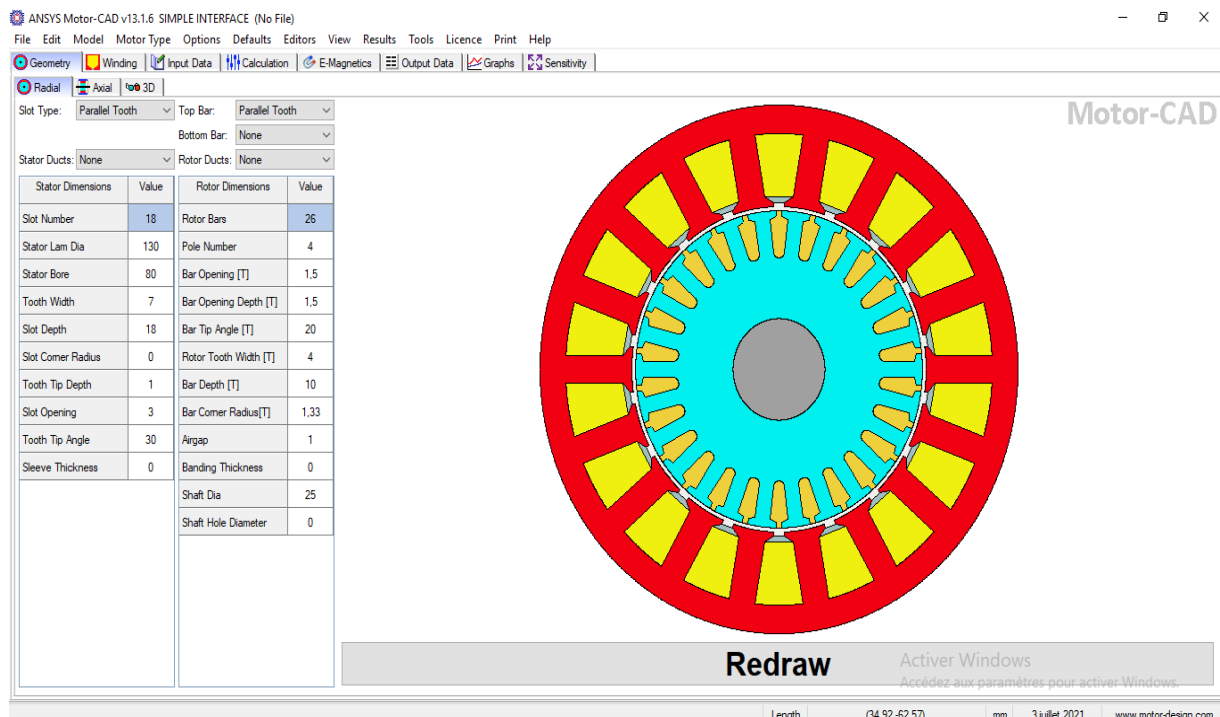


Figure IV.2. Interface de logiciel

IV .4.Géométrie de la machine

La figure (IV.3) représente la géométrie de notre moteur sous l'environnement AnsysMotor-CAD. Après avoir introduit les dimensions géométrique, les matériaux et construit le bobinage, nous passerons à la simulation électromagnétique et thermique du moteur.

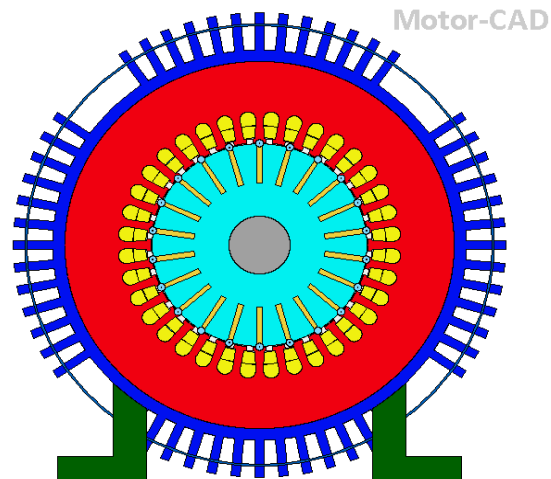


Figure IV.3.a. Géométrie radiale de moteur asynchrone à cage d'écureuil selon Ansys

Motor-CAD

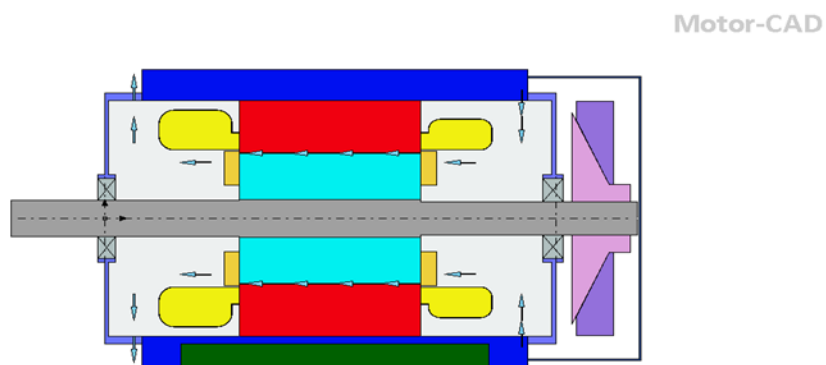


Figure IV. 3. b. Géométrie axiale de moteur asynchrone à cage d'écureuil selon Ansys

Motor-CAD

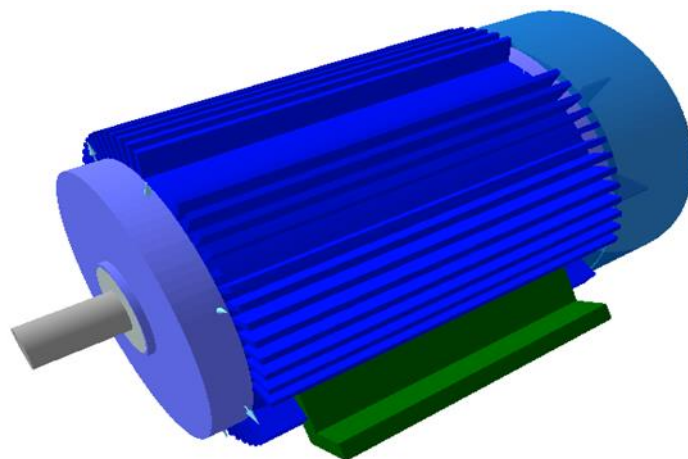


Figure IV. 3. c : Vue en 3D de machine

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

IV. 4. 1. Calcul du bobinage

Le bobinage du moteur est de type concentrique, double couches 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 paramètres de sa construction sont donnés par les formules suivantes :

- Nombre d'encoches par pôle par phase :

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

- Le pas polaire τ

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

Facteur de bobinage

Le facteur de bobinage statorique k_{en} devient

$$k_{en} = k_d \times k_r \times k_i \quad (\text{IV.3})$$

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

Facteur de distribution

Le facteur de distribution est déterminé par le nombre d'encoche par pôle et par phase :

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

α : zone de phase

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

γ : angle électrique entre deux phase

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

Coefficient de raccourcissement

Le Coefficient de raccourcissement K_r est défini par :

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

Avec :

β : rapport de raccourcissement

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

y : pas d'enroulement

$$y = \frac{z}{2p} - \varepsilon_1 \quad (\text{IV.9})$$

ε_1 : raccourcissement. $\varepsilon_1 = 5$

Tableau IV. 2 : caractéristiques des bobines statoriques.

Caractéristiques	Valeur
Nombre d'encoches par pôle par phase q	6
Le pas polaires z_1	18
Facteur de bobinage k_{en}	0.866
Zone de phase α	60°
Pas d'enroulement y	13

Les paramètres trouvés ont été appliqués pour concevoir notre bobinage sur le logiciel. La figure (IV. 4) et le figure (IV.5) Représentent le schéma panoramique et radiale la distribution du bobinage :

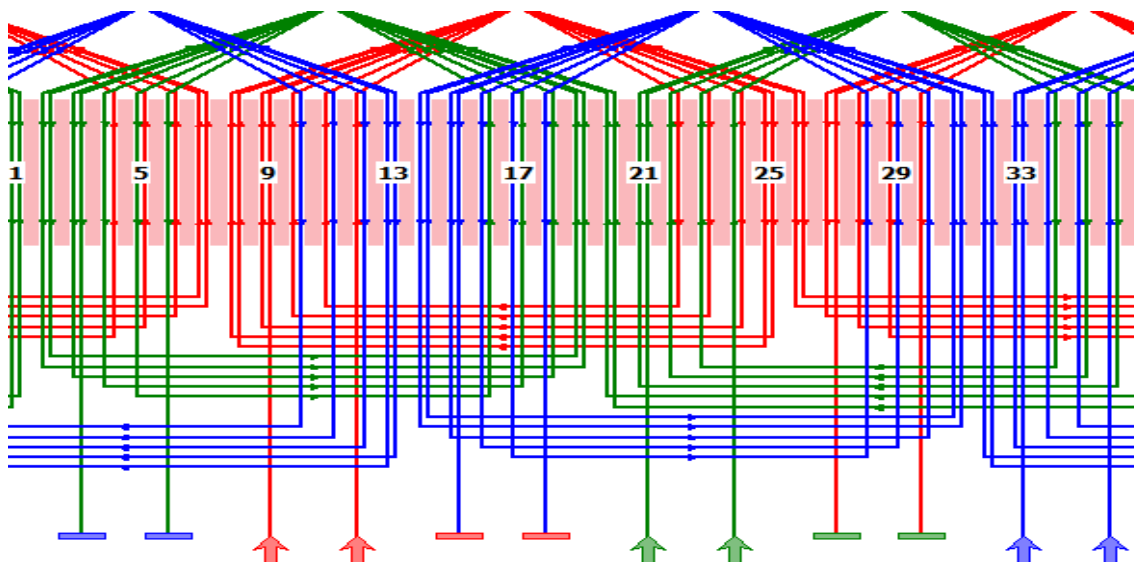


Figure IV. 4: schéma de bobinage

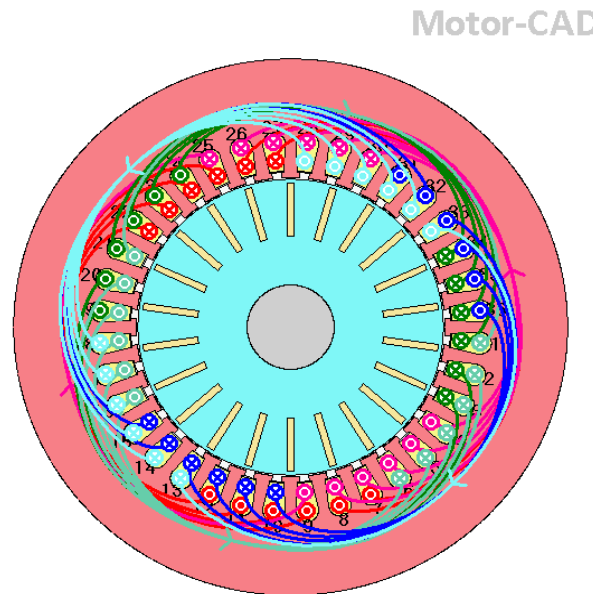


Figure IV. 5: Distribution de bobinage

IV. 4.2. La Courbe de première aimantation

Cette courbe de première aimantation est obtenue après de la saisie des valeurs acquises de l'expérimentation.

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 constate que l'application d'un champ magnétique régulièrement croissant provoque l'apparition d'une induction magnétique B(H) jusqu'à une valeur maximale qui correspond à l'état de saturation.

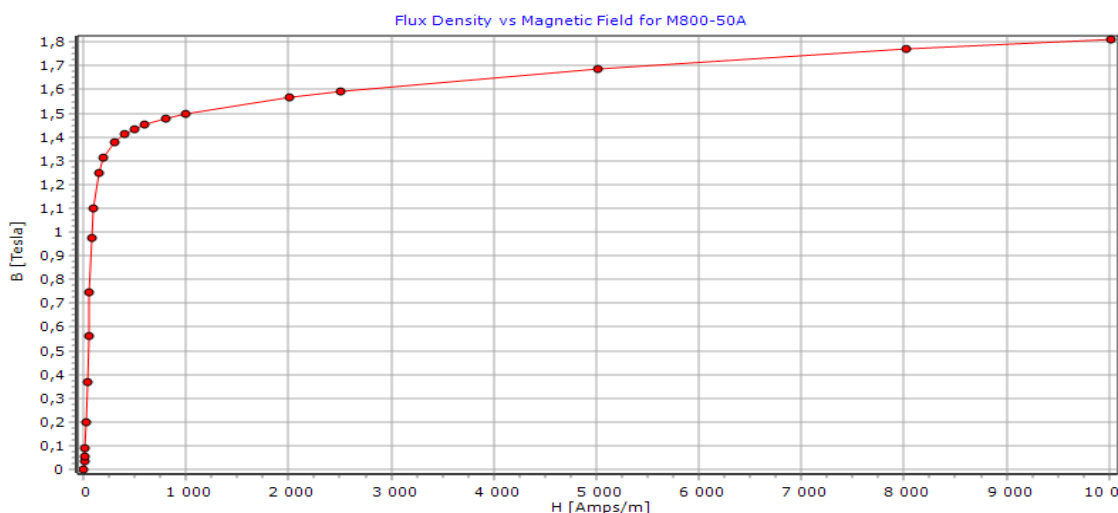


Figure IV.6 .Courbe de première aimantation de la tôle magnétiqueM800-50A

IV. 4.3.courbe des pertes spécifiques de tôle M800-50A

La courbe de Figure (IV.7) a une forme parabolique qui signifie que les pertes spécifique à fréquence fixe sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique.

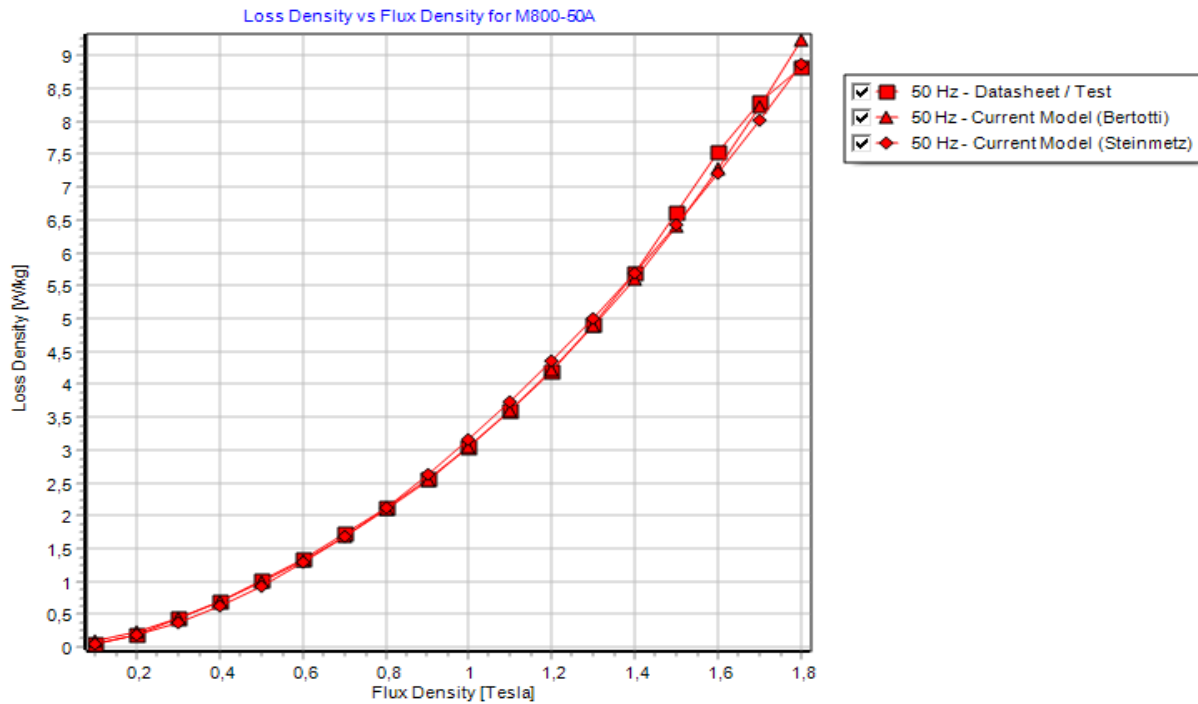
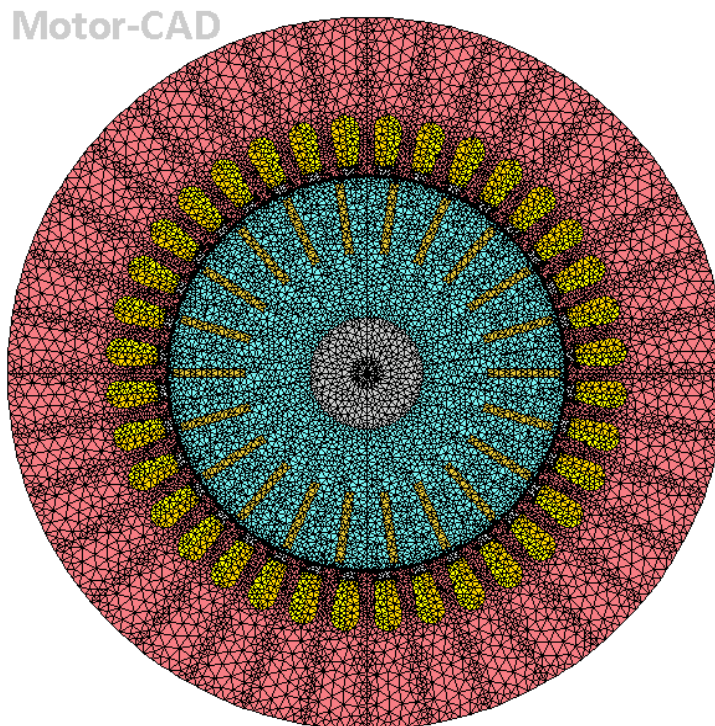


Figure IV. 7. Courbe des pertes spécifiques de tôle M800-50A

IV.5.1.1. 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, les dents statoriques, les barres rotoriques et sur les zones très proche à l'entrefer.



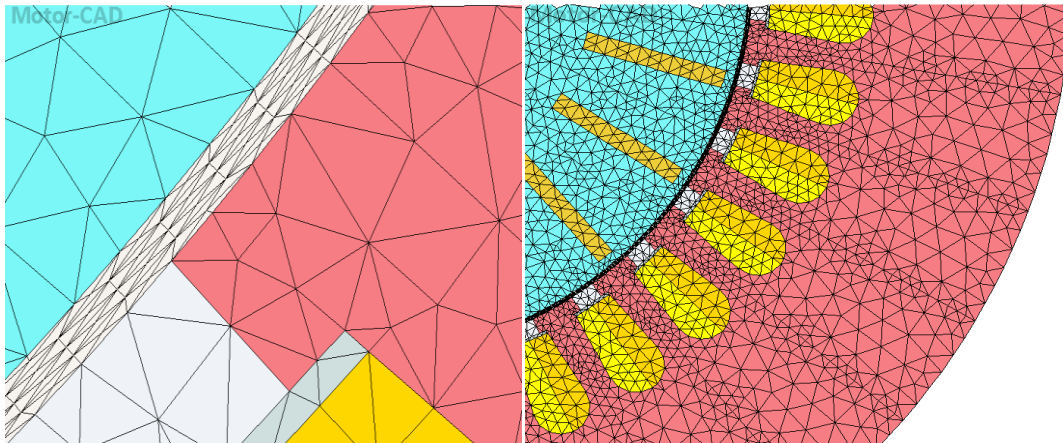


Figure IV.8 Maillage de moteur

IV. 5.1.2. Cartographie du champ magnétique

La figure (IV.9) montre la distribution des lignes de champ, l'induction et les densités des courants induits

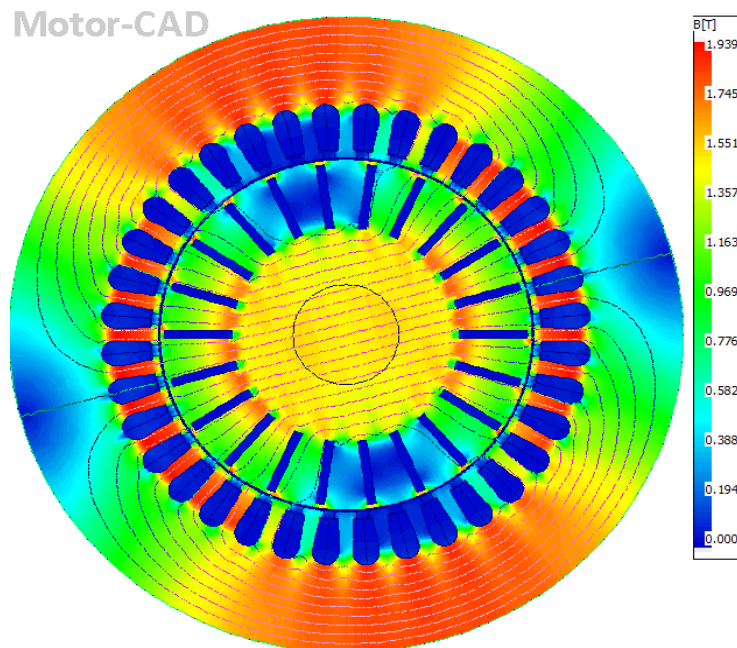


Figure IV. 9. l'induction magnétique

La cartographie de l'induction démontrent que la machine est bipolaires et que les valeurs de l'induction concordent bien avec les valeurs injectées dans la courbe de première aimantation.

IV.5.1.3.Caractéristiques électromécaniques

Les figures (IV.10) et (IV.11) représentent respectivement les caractéristiques électrique et mécanique, du moteur. On voit bien que les allures obtenues correspondent à celles d'un moteur de classe F de la classification NEMA qui correspond aux moteurs asynchrones à encoches profondes.

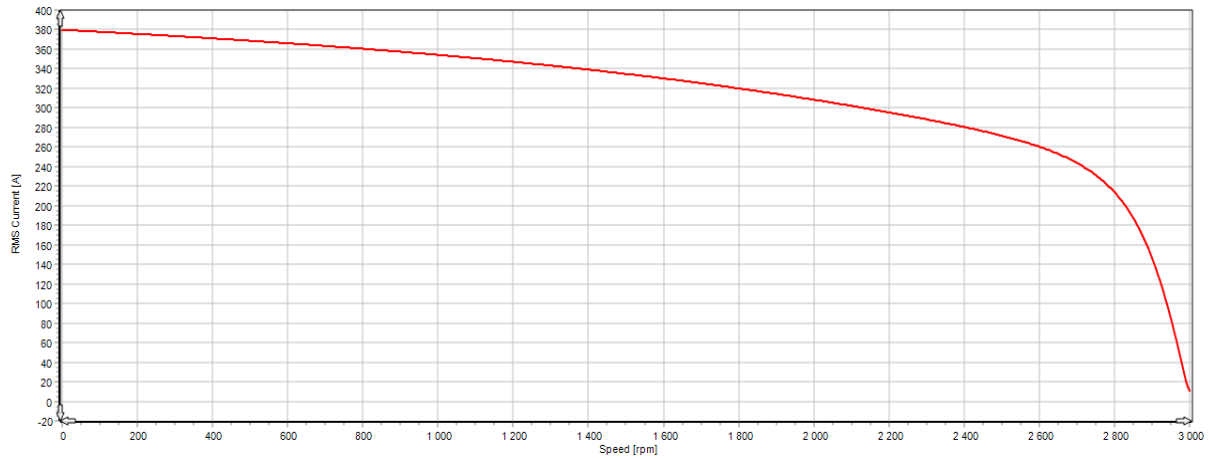


Figure IV. 10. Courant de phase en fonction de la vitesse

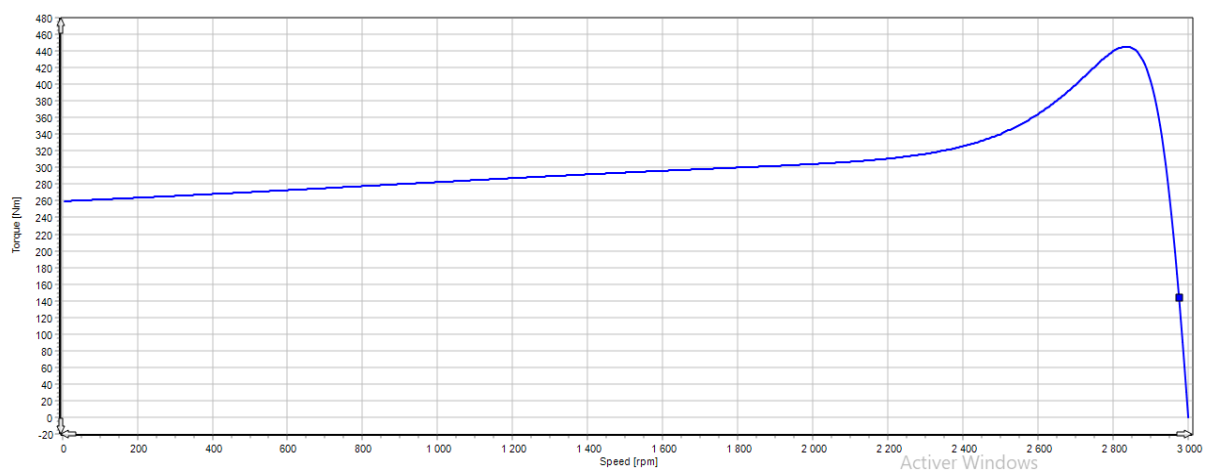


Figure IV. 11. Couple du moteur en fonction de la vitesse

IV.5.1.4. Caractéristiques magnétodynamique

Nous avons simulé le comportement de notre moteur en charge, ce dernier est alimenté en triangle avec une tension de 380 Volt entre phases et chargé avec une charge égale à son couple nominal. Les résultats obtenus sont donnés par les graphes suivants :

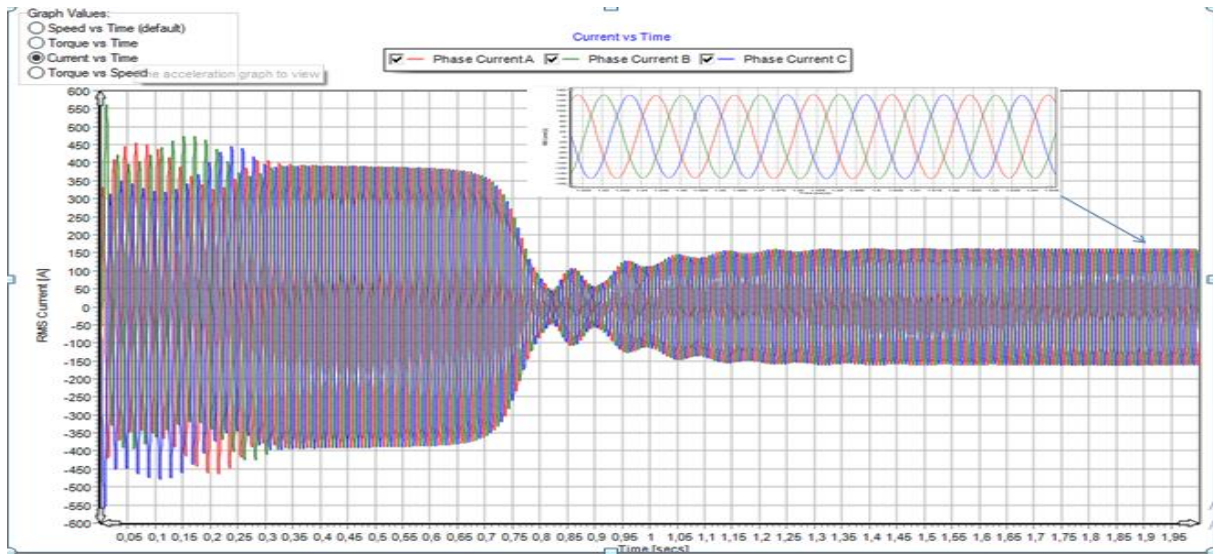


Figure IV.12. Courbes des courants de phases en charge

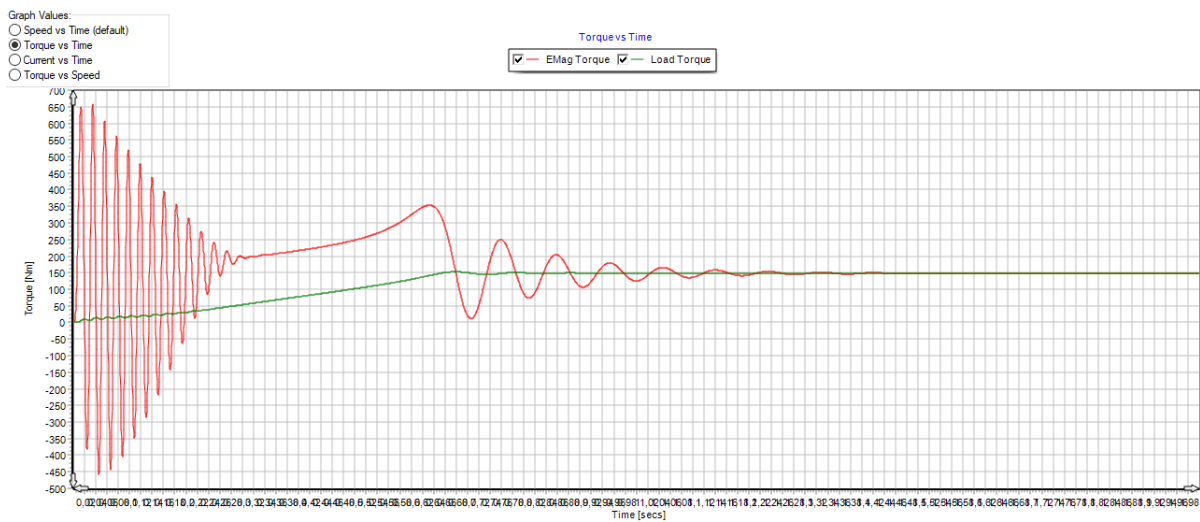


Figure IV.13. Courbe de variation de couple en fonction de temps

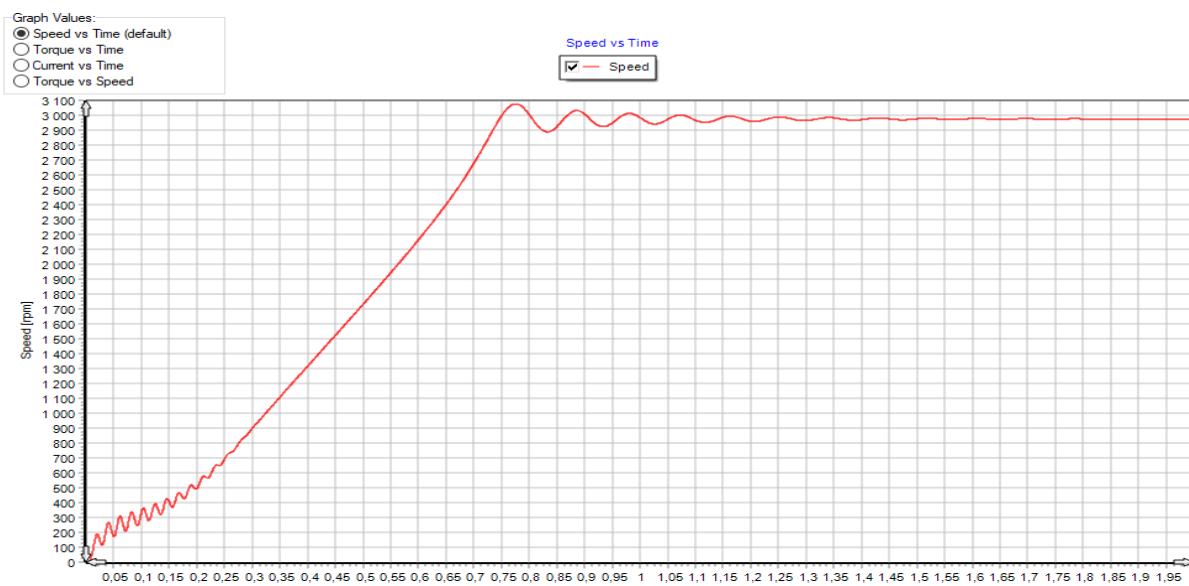


Figure IV.14. Courbe de vitesse de rotation en fonction de temps

Les courants de démarrage dans le régime transitoire représentent l'un des gros problèmes de la machine asynchrone. Il apparaît un courant intense, ce courant est de l'ordre de 5 à 8 le courant nominal, ce qui crée à la fois une contrainte au moteur lui-même et une gêne pour le réseau d'alimentation. La figure (IV.12) montre les courants absorbés par la machine. La valeur du courant absorbé concorde bien avec celle fournie par l'usine.

Le moteur tourne à une vitesse voisine de la vitesse synchrone lorsqu'il n'est pas chargé. Quand on le charge, il ralentit. Le champ tournant coupe alors les barres du rotor à une vitesse relative plus grande. Il en résulte que la tension induite et le courant dans le rotor augmentent de façon à développer un couple suffisant pour vaincre la charge mécanique à entraîner. La vitesse se stabilise lorsque le couple développé par le moteur est exactement égal au couple imposé par la charge.

La courbe du couple en fonction du temps montre que le moteur simulé répond bien à l'application du couple de charge. On ne peut augmenter indéfiniment la charge mécanique appliquée à un moteur asynchrone ; si la charge dépasse une certaine valeur, la vitesse tombe subitement et le moteur décroche.

IV.1.5. Induction dans l'entrefer

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

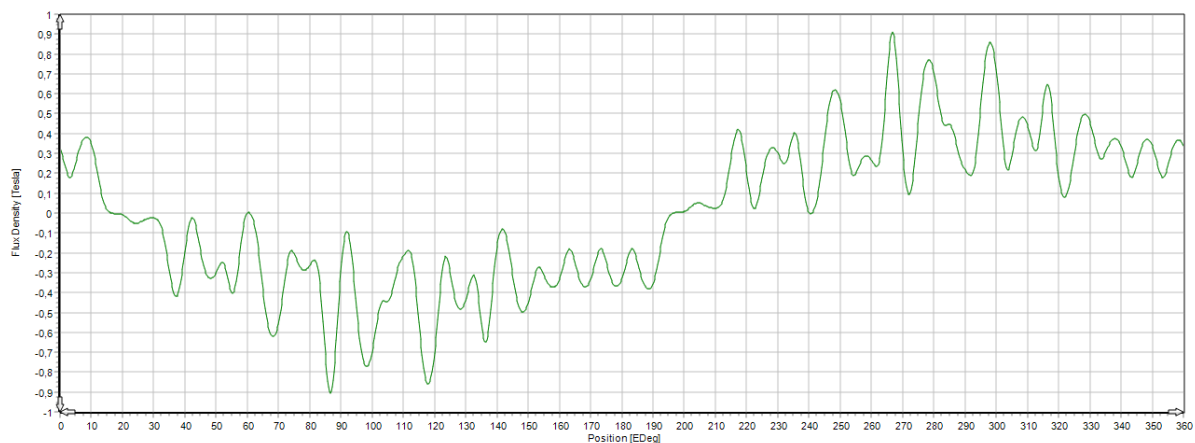


Figure IV. 15. Distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer

De la figure (IV.15), nous observons une induction bipolaire ondulée. Cette ondulation est due aux harmoniques de l'espace causés par la géométrie non uniforme de la machine.

IV.5.2.1. distribution de température de modèle couplé électromagnéto-thermique à une température ambiante

La figure (IV. 16) et la figure (IV.17) représentent la distribution de température de notre moteur sous l'environnement Ansys Motor-CAD. Après avoir introduit les dimensions géométriques de la carcasse et caractéristiques thermiques des matériaux de chaque composant de moteur, nous avons procédé à la simulation du modèle thermique de la machine.

La température de chaque composant du moteur a été fixée, à une température ambiante de 33°C.

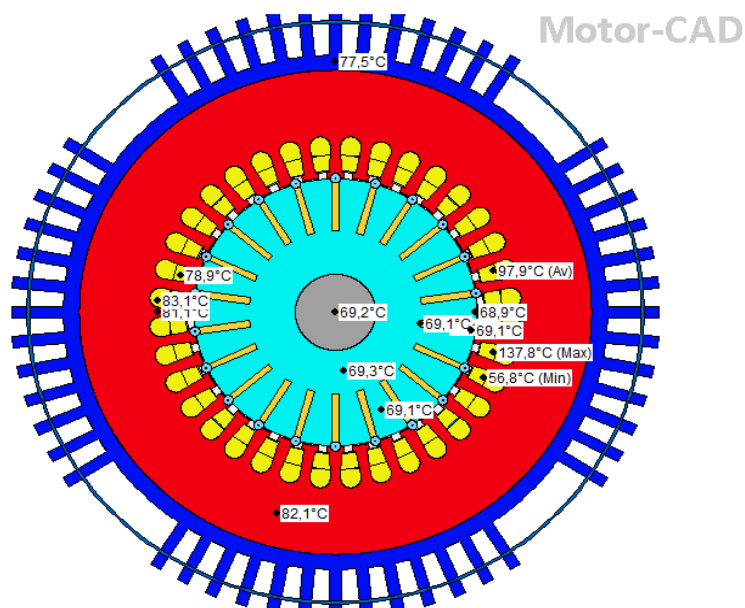


Figure IV. 16. Vue radiale de la distribution de température du moteur par Ansys Motor-CAD.

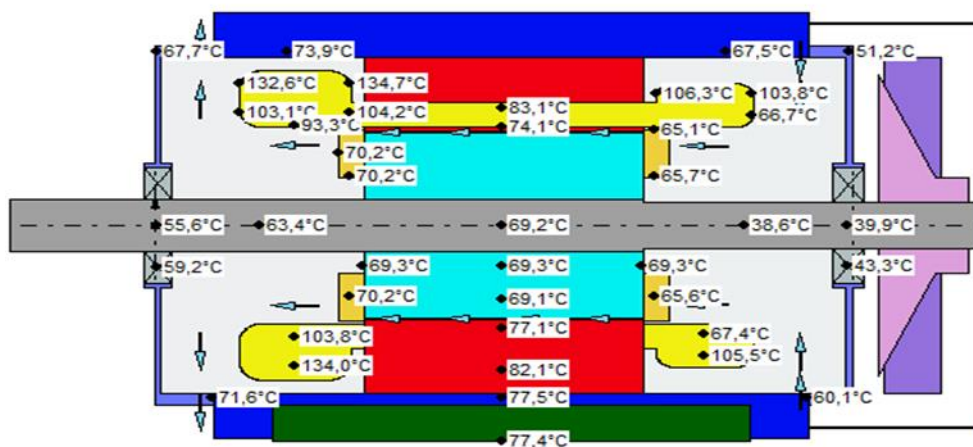


Figure IV. 17. Vue axiale de la distribution de température du moteur de test par Motor-CAD

Dans cet essai, les enroulements sont parcourus par un courant de valeur $I = 79$. Les deux sources de chaleur sont les pertes joules dans les enroulements et les pertes fer dans le circuit magnétique du moteur.

Les cartographies thermiques, issue de la simulation du modèle thermique de la machine, sont illustrées dans les figures(IV.16) et(IV.17). Ces figures montrent les températures simulées pour les différentes zones de la machine. La température la plus élevée se trouve au niveau des têtes de bobines comme indiqué dans la littérature.

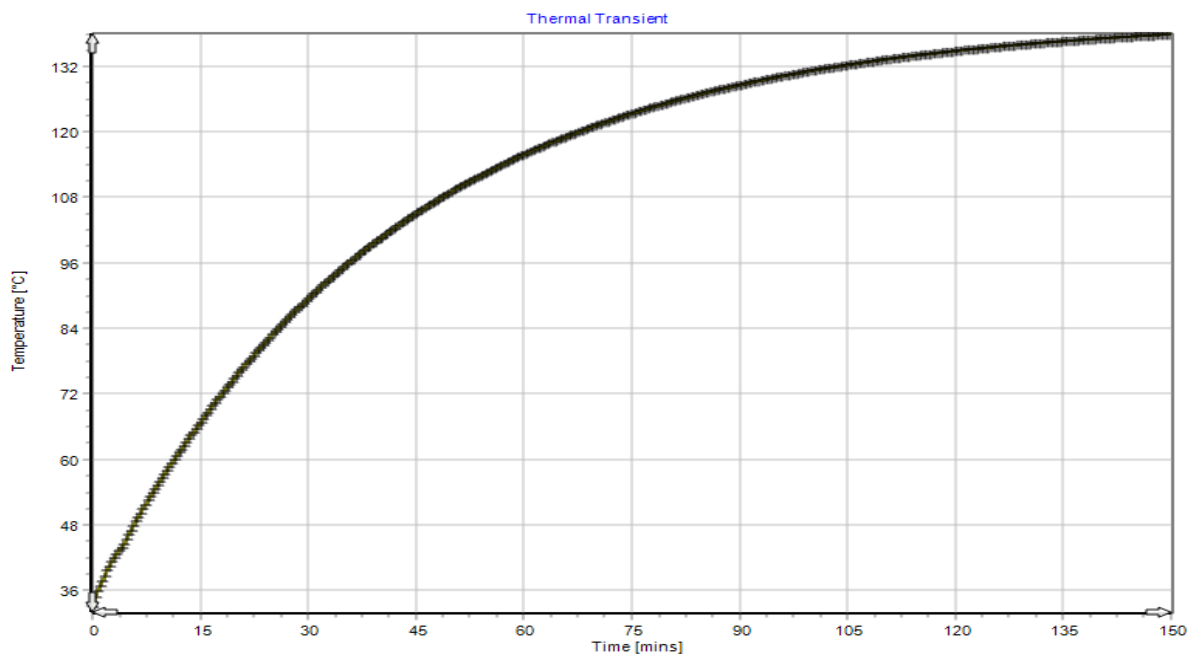
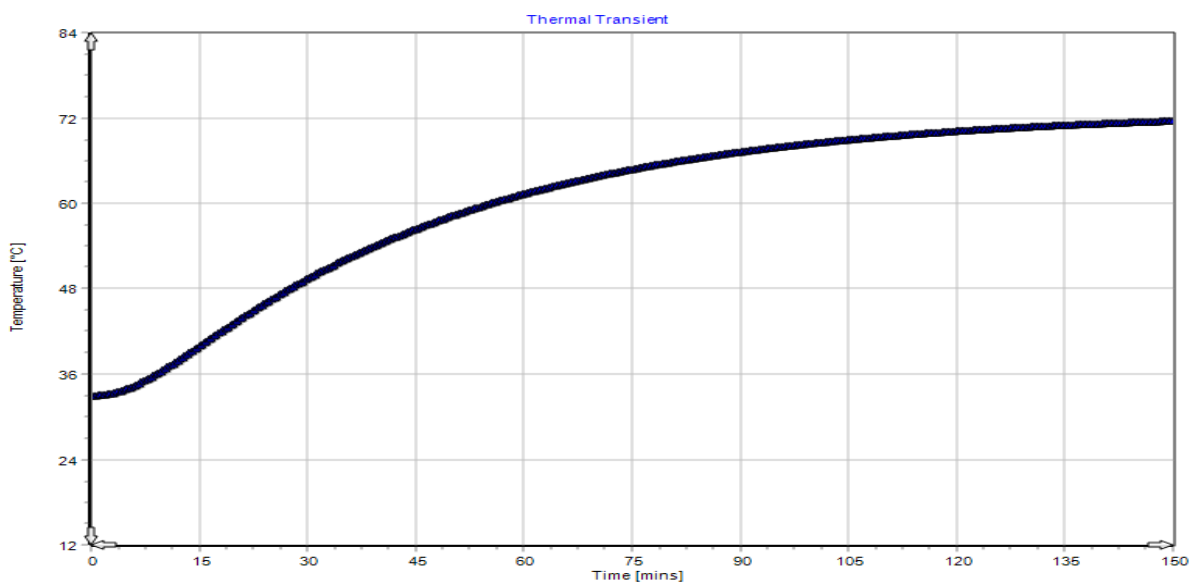


Figure IV.18. Courbe variation de température maximale existée dans le moteur les têtes de bobine



FigureIV.19. Courbe de variation de température dans la carcasse en fonction de temps.

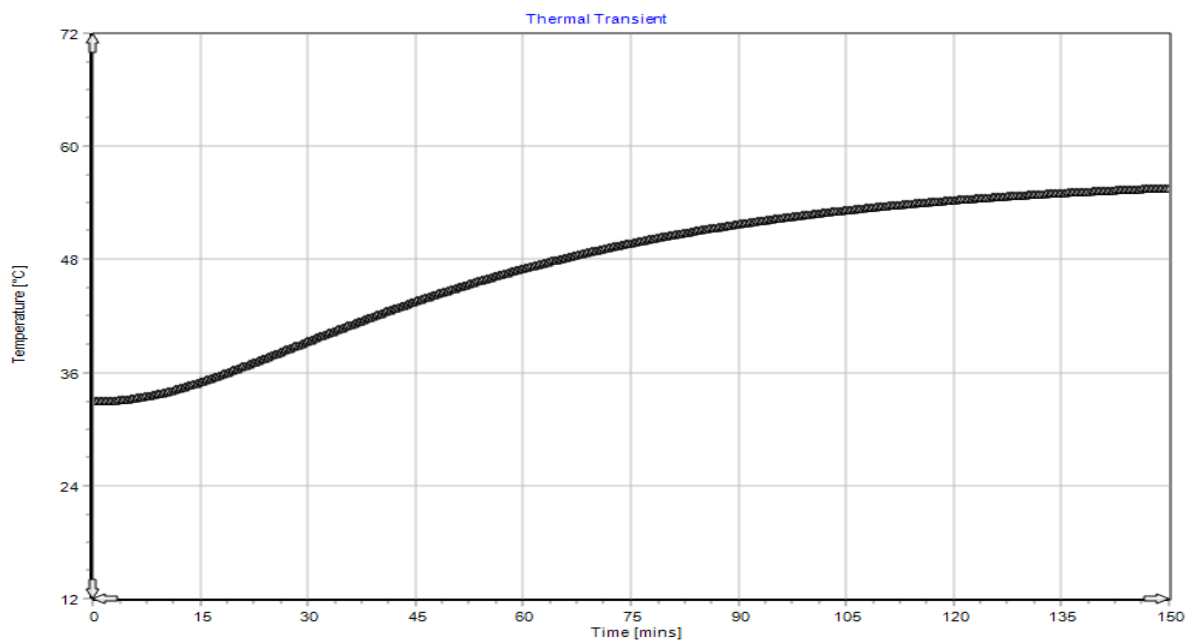


Figure IV.20. Courbe de variation de température dans l'arbre en fonction de temps

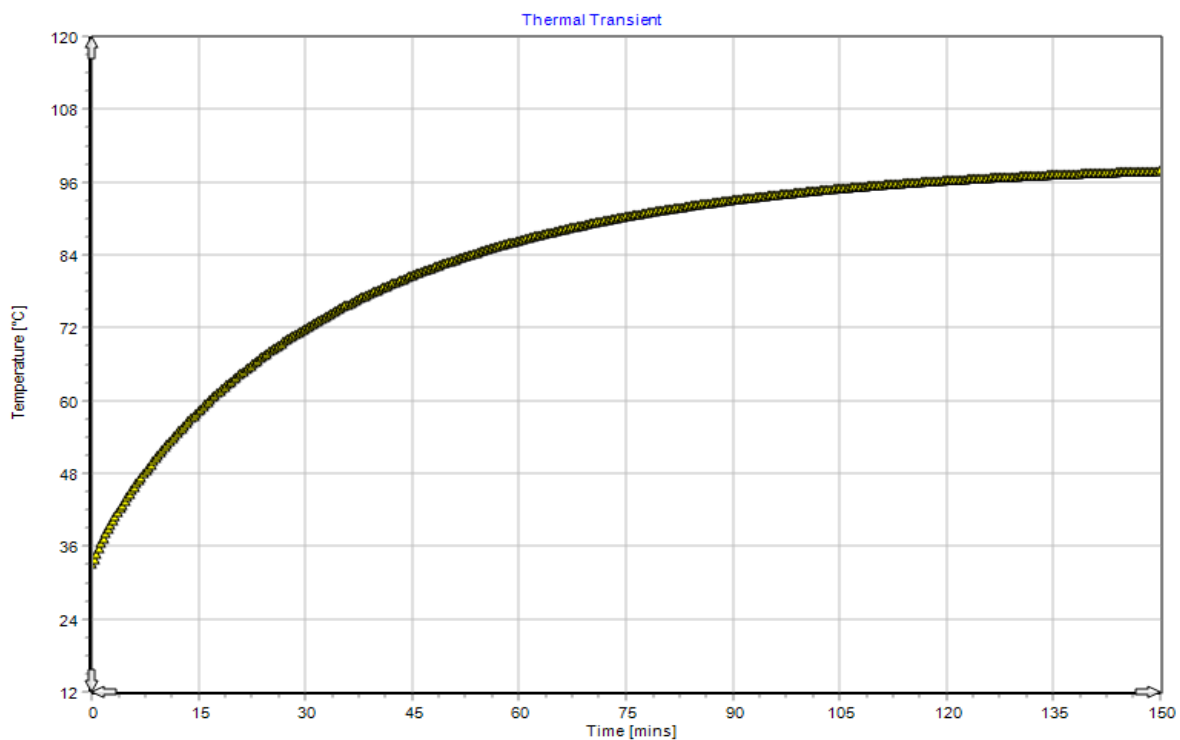


Figure. IV.21 .courbe de variation de température dans le bobinage en fonction de temps

Les figures (IV.18), (IV.19), (IV.20) et (IV.21) représentent respectivement les températures dans la tête de bobine, la carcasse, l'arbre et le bobinage. Chaque courbe passe à

deux régime ; le régime non stable et le régime transitoire. Chaque température commence par la valeur ambiante de la machine (33°C). Ensuite après un temps il passe au régime permanent qui signifie la stabilisation de température dans chaque composante de moteur.

IV.5.2.2.Effet de la ventilation

Les figures (IV.22) et (IV.23) représentent la distribution de la température dans les différentes parties du moteur en présence et en absence de la ventilation.

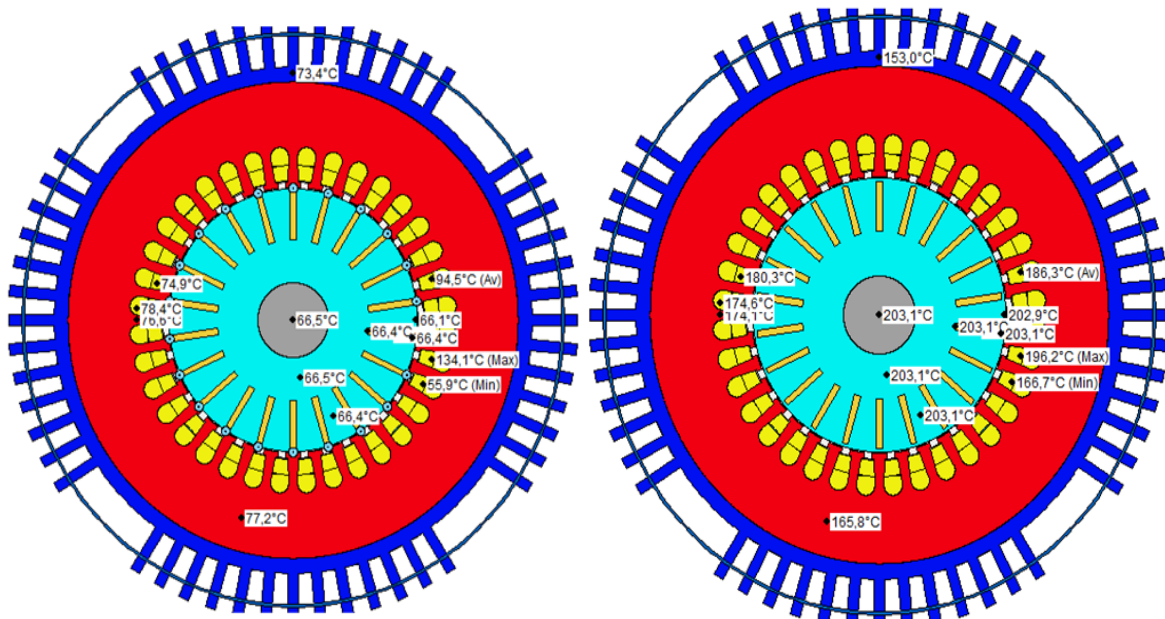


Figure IV.22. Vue radiale de la distribution de température du moteur par Ansys Motor-CAD.

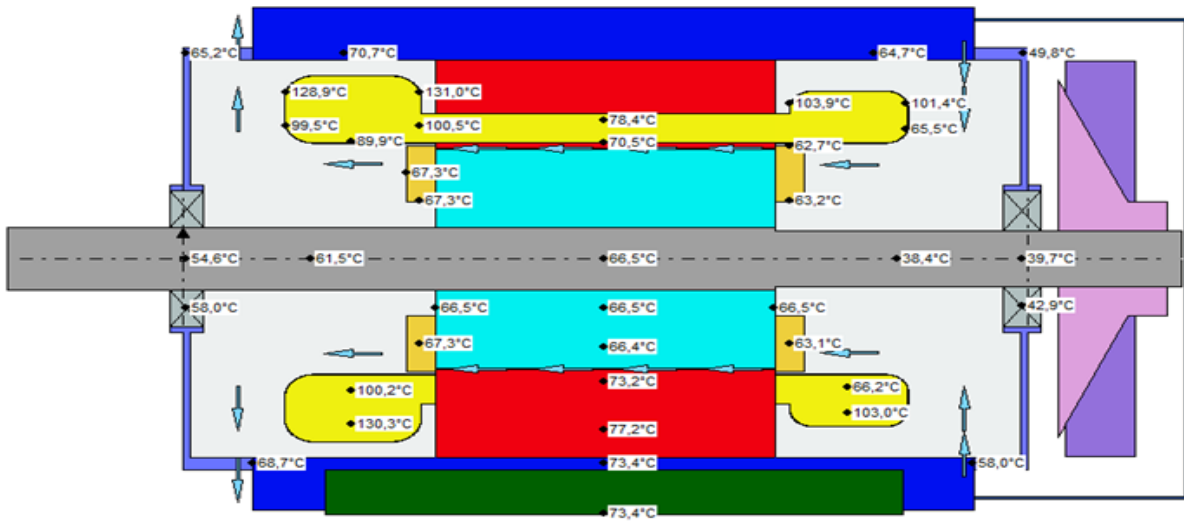


Figure IV.23.a. Avec ventilation.

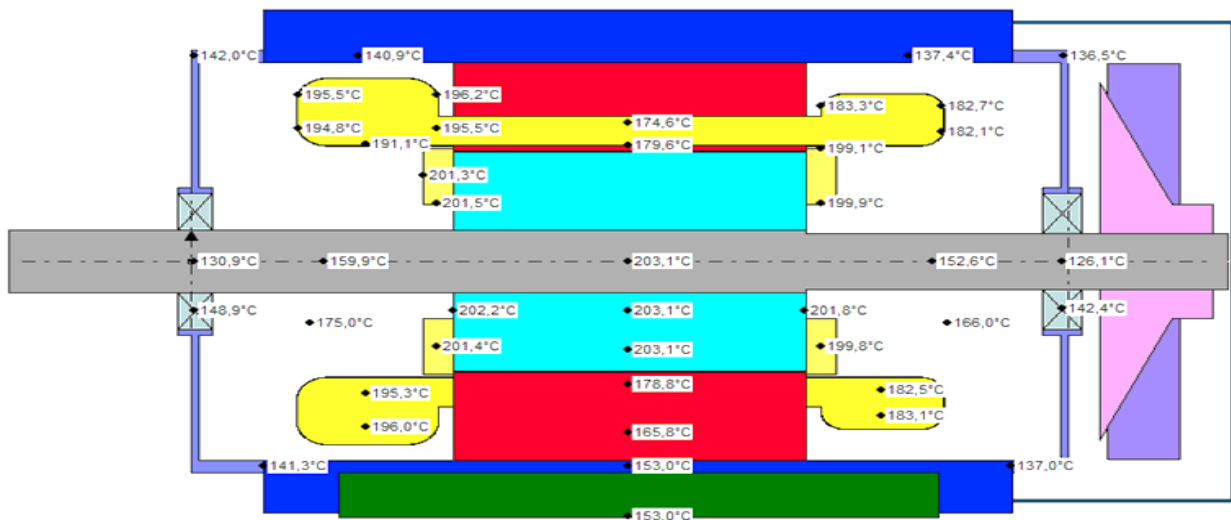


Figure IV.23.b. Sans ventilation

Figure IV.23. Vue axiale de la distribution de température du moteur de test par Motor-CAD

Les résultats obtenus nous ont permis de vérifier l'effet de la ventilation sur le refroidissement du moteur. Nous remarquons que la température s'élève considérablement dans les différentes zones en l'absence de la ventilation.

IV.5.2.3. Distribution de température moteur asynchrone en absence des ailettes

Les figures (IV.24) et (IV.25) représentent la comparaison entre la distribution de température du moteur asynchrone en présence et en absence des ailettes.

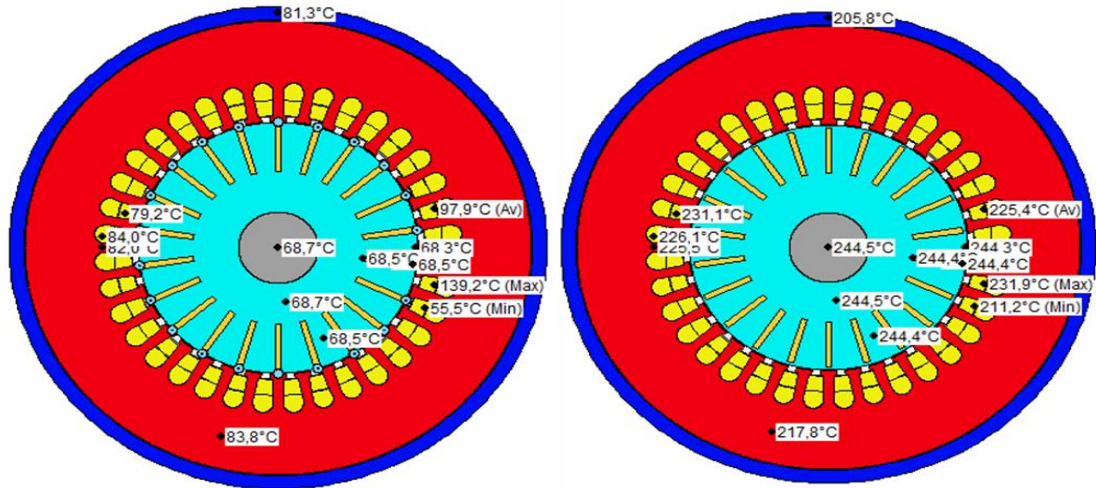


Figure IV.a.Sans ailettes avec ventilation **Figure IV.b.** Sans ailettes et sans ventilateur

Figure IV.24: Vue radiale de la distribution de température du moteur sans ailettes par Ansys Motor-CAD

Sans et avec la présence de ventilateur.

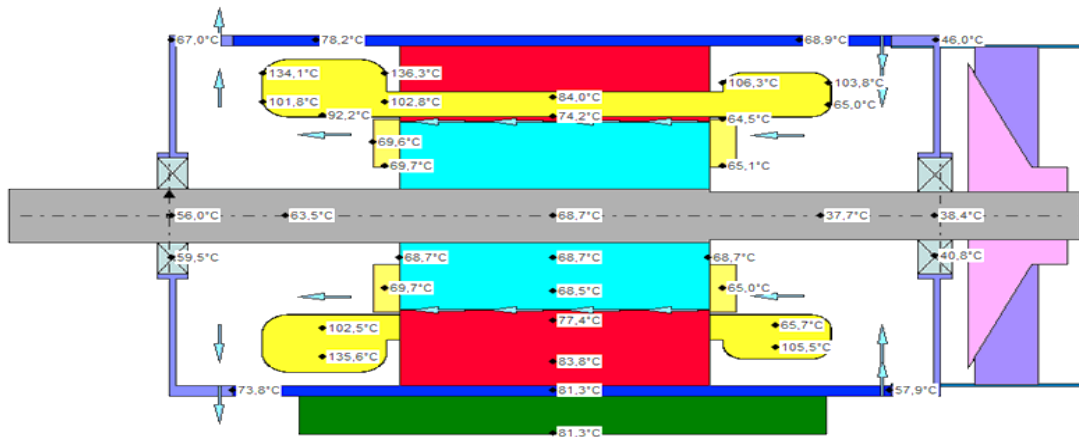


Figure IV.25.a. Sans ailettes avec ventilation

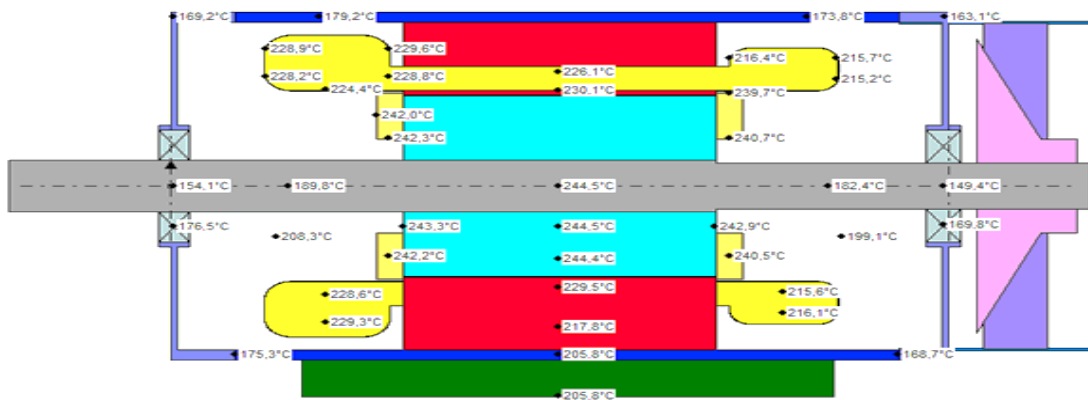


Figure IV.25.b. Sans ailettes et sans ventilateur

Figure IV.25. Vue axiale de la distribution de température du moteur sans ailettes par Ansys Motor-CAD

Les ailettes sont un organe très important dans les systèmes de refroidissement des moteurs électriques car elles permettent d'avoir un meilleur transfert de chaleur à travers l'augmentation de la surface de contact avec l'air ambiant.

IV.6.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons effectué la simulation magnétothermique basée sur la méthode des éléments finis d'un moteur asynchrone à cage de 45 KW de l'entreprise Electro-Industries.

L'utilisation de logiciel Ansys Motor-CAD a permis de faire la simulation des différents modèles et d'obtenir des résultats électromagnétiques, mécanique ainsi que des résultats thermiques

Conclusion Générale

Conclusion générale

De tous les moteurs électriques, le moteur à induction est le plus répandu, il n'est donc pas du tout surprenant de voir qu'il fait encore l'objet de nombreux travaux de recherche visant à améliorer sa modélisation et à optimiser sa conception. En dépit de sa simplicité de fabrication et de mise en œuvre, la modélisation et le calcul du moteur à induction ne sont pas des choses aisées.

En effet, le couplage qui existe entre les phénomènes électromagnétique, thermique et mécanique impose une modélisation fine et simultanée de tous les phénomènes. Ce problème complexe peut difficilement être résolu en un temps raisonnable, et on est souvent amené à des simplifications qui doivent, toutefois, rester compatibles avec l'objectif visé.

Nous avons, au cours de ce travail, abordé la modélisation par éléments finis d'un moteur asynchrone de 45 kW fabriqué par l'entreprise nationale Electro-Industries d'Azazga. Cette méthode intégrée dans le logiciel de C.A.O Ansys Motor-cad résout de gros problèmes inhérents à l'activité de conception (prédiction des performances, limitation du nombre de prototypes,...) des moteurs asynchrone, en permettant à l'utilisateur de modifier les différents paramètres de la machine.

En effet nous avons réalisé deux simulations. L'une magnétodynamique pour déterminer les performances électromagnétique du moteur et la distribution du champ à l'intérieur. Par la suite et on transférant les données au solveur thermique du logiciel nous avons pu avoir la distribution de la température dans les différentes zones de la machine.

Les résultats obtenus ont été confrontés aux résultats de mesures fournis par l'entreprise. Une très bonne concordance a été observée.

Comme perspectives de ce travail, nous proposons :

- Une modélisation du refroidissement de la machine
- Une étude convertisseur/machine
- L'étude d'autres types de machines avec la méthode des éléments finis

Bibliographie

Bibliographie

- [1] F. Megherbi, N. Kichou, « Dimensionnement en vue de l'amélioration des performances du moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil EI de type 3kW- 1410tr/min », Mémoire d'ingénieur, Tizi Ouzou, 2013.
- [2] C. Birouche, N. Kichou, « dimensionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil », Mémoire d'ingénieur, Tizi Ouzou, 2013.
- [3] Y. Benguedouar, « Algorithme d'optimisation par essaim de particules (OEP) Application à l'amélioration des moteurs El-Azazga, Algérie ». Mémoire de Master académique. Ouargla. 2012.
- [4] T. Tayebi N. Tadbirt, « Les machines industriels et les étapes de la fabrication des pièces mécanique de la machine tournante », Rapport de Stage Electro-Industries, Azazga, 2018.
- [5] O. Ondel, « Diagnostic par reconnaissance des formes : Application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone», Thèse de Doctorat, France, 2006.
- [6] T.Wildy, G.Sybille, « Electrotechnique 4eme édition », édition De Boeck, Paris, 2005.
- [7] C. Chevassu, « Généralités sur les machines électriques tournantes », O1MM 2e année, version de septembre 2012.
- [8] G. Segulier, F. Nottelet, « Electrotechnique industrielle », édition Lavoisier, 1996.
- [9] M. Kostenko, L. Piotrovski, « Machines électriques » tome II, Editions Mir, 1969.
- [10] J.Chatelain, « Machines électriques», édition Dunod, Paris, 1986.
- [11] R. Abdessemed, « Electrotechnique : Les enroulements des machines électriques, Différents types, spécificités, conception, placement », édition Ellipses, 2012.
- [12] G. Spinnler, « Conception des machines, principe et applications », édition Lausanne, 1998.
- [13] Brissonneau Pierre « magnétisme et matériaux magnétiques pour l'électrotechnique », Edition Hermes, PARIS, 1997
- [14] A. Kedous-Lebouk, « matériaux magnétiques en génie électrique TOME 1 », Edition Lavoisier, 2006.
- [15] L. Senani, « Dimensionnement analytico-empirique et analyse des Performances des moteurs asynchrones de moyennes puissances », Mémoire de master académique, Tizi Ouzou, 2018.
- [16] R.Redjem, "calcul et conception assistés par ordinateur des machines électriques",

mémoire de magister ,2006.

[17] N. Phi-hung, " Impacts des modèles de pertes sur l'optimisation sur cycle d'un ensemble convertisseur – machine synchrone. Applications aux véhicules hybrides " thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan, 2011.

[18] A. Fasquelle, "Contribution à la modélisation multi-physique électro-vibro-acoustique et aérothermique de machines de traction", thèse de doctorat à l'école centrale de Lille, Spécialité : Génie Electrique, 2007.

[19] J. Lutun, " Modélisation thermique des alternateurs automobiles", Thèse de doctorat de Grenoble IN.

[20]. ChouaibLabioud, «Modélisation des phénomènes électromagnétiques dans une machine à reluctance variable », thèse de Magister université de biskra, 12/05/2014

[21] M. Feliachi, « Contribution au calcul du champ électromagnétique par la méthode des éléments finis en vue d'une modélisation dynamique des machines électriques», Thèse de doctorat, Paris, 1981

[22] J.P. Bardon, « Introduction à l'étude des résistances thermiques de contact », Revue Générale de Thermique, n°125, pp. 429-447, mai 1972

[23] S.Mezani, ''Modélisation thermique d'un moteur asynchrone à cage''. Mémoire de Magister, U.S.T.H.B., 2000.

[24] M. Bouheraoua, ''Contribution à la modélisation thermique d'un moteur asynchrone à cage''. Mémoire de Magister, U.M.M.T.O. 2001

[26] S. Laissaoui, '' Modélisation dynamique d'une machine électrique tenant compte des contraintes thermiques''. Mémoire de Magister, Université de Jijel, 2004.

[27] D.Roye, ''Modélisation thermique des machines électriques tournantes. Application à la machine à induction''. Thèse de Docteur d'Etat és-sciences, U.S.M. et I.N.P. de Grenoble,Paris, Novembre 1983.

[28]. M Yao Bi N'guessan, Jean-Luc, " Méthode des Eléments Finis Mixtes et Conditions Aux Limites Absorbantes Pour la Modélisation des Phénomènes Electromagnétique Hyperfréquences", Thèse de Doctorat, L'école Doctorat de Lyon ,1995.

Résumé

De tous les moteurs électriques, le moteur à induction est le plus répandu. Il n'est donc pas du tout surprenant de voir qu'il fait encore l'objet de nombreux travaux de recherche visant à améliorer sa modélisation et à optimiser sa conception. En dépit de sa simplicité de fabrication et de mise en œuvre, la modélisation et le calcul du moteur à induction ne sont pas des choses aisées. En effet, le couplage qui existe entre les phénomènes électromagnétique et thermique impose une modélisation fine et simultanée des deux phénomènes.

L'objectif de ce travail est la modélisation multiphasique magnétothermique d'un moteur asynchrone à cage en régime transitoire et permanent. Pour cela, la méthode des éléments finis a été utilisée pour simuler les phénomènes électromagnétiques puis pour résoudre le problème thermique. Différents scénarios avec ou sans ventilation et avec ou sans ailettes ont été considérés. Les résultats trouvés concordent bien avec la réalité physique.

Mots clés : Moteur asynchrone, modélisation numérique, équation de Maxwell, modèle magnétique, modèle magnétothermique.

Abstract

From all the electric motors types, the induction motor is the most common. Therefore, it's not a surprise to notice that it is still the subject of many research aiming to improve its modeling and optimize its design. Despite its simplicity of manufacture and implementation, modeling and calculating the induction motor is not easy. Indeed, the coupling, which exists between the electromagnetic and thermal phenomena, imposes a fine and simultaneous modeling of the two phenomena.

The objective of this work is the modeling of magnetothermal coupling phenomena in an induction motor in transient and permanent regime. For that, the finite element method was used to simulate the electromagnetic phenomena then to solve the thermal problem. Different scenarios with or without ventilation and with or without fins were considered. The results found agree well with physical reality.

Keywords: Induction motor, numerical modelling, Maxwell's equations, magnetic model, magnetothermal model.