

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

**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES**



**Faculté des Sciences de l'Ingénieur**  
**Département Ingénierie des Systèmes Electriques**

## **Mémoire de Master**

Présenté par :

**Mr. AYADI Abderrahim**

**Mr. SAADI Younes**

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machines Electriques

---

# **Dimensionnement et analyse des performances d'un moteur asynchrone à double cage de 250kW**

---

**Soutenu le 21/09/2020 devant le jury :**

Mr. BOUDOUDA	Aimad	MCA	UMBB	Président
Mr. HAMEL	Meziane	MCB	UMBB	Rapporteur
Mme. HACHICHE	Nadjet	Ingénieur	Electro-Industries	Rapporteur
Mme. ABDESLAME	Djamila	MCB	UMBB	Examineur
Mlle. LARABI	Zina	MAA	UMBB	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

**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 remercions aussi, Monsieur Aïmed BOUDOUDA, MCA à l'UMBB, de nous avoir fait l'honneur de présider le jury de notre soutenance.

Merci à Madame HACHICHE Nadjat, Ingénieur à Électro-Industries, 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 de remercier tout le personnel de l'Électro-Industries qui nous a beaucoup aidés à bien comprendre la construction de chaque machine et son fonctionnement. Nous remercions tout particulièrement le doyen des techniciens AMMI ALI pour sa disponibilité et ses qualités humaines.

Nous remercions vivement, Mademoiselle LARABI Zina, MAA à l'UMBB, et Madame ABDESLAME Djamilia, MCB à l'UMBB, pour avoir accepté d'examiner notre travail.

C'est par un grand plaisir qu'un devoir, d'exprimer notre gratitude et reconnaissance à toutes les personnes ayant contribué 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 soeurs**

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.

Je ferais une exception à mon amies TAGUERCIFI A, BADACHE.Y ,  
OUCHAOUCHI.O ,GAILA.R,GAILA.Y,KARALI.A

Sans oublier mon binôme SAADI.Y.

AYADI Abderrahim

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

A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père.

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureux: mon adorable mère .

A ma chère sœur qui n'a pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Dieu la protège.

A mon adorable petite sœur qui sait toujours comment procurer la joie et le bonheur pour toute la famille.

A mon frer Mohamed qui n'a pas cessé de me conseiller et encourager.

A mes grands-mères, mes oncles et mes tantes. Que Dieu leur donne une longue et joyeuse vie.

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 AYADI ABDERRAHIM pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet

SAADI Younes

# *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 .....	5
I.5. Ateliers de découpage .....	5
I.5.1. Procédé de découpage .....	6
I.5.2. Embaquetage.....	7
I.5.3. Fabrication des capots de ventilateurs .....	8
I.6. Ateliers de moulage sous pression .....	9
I.7. Ateliers d'usinage .....	9
I.7.1. Fabrication de l'arbre .....	9
I.7.2. Usinage du rotor.....	10
I.7.3. Usinage des carcasses .....	11
I.8. Ateliers de bobinage.....	12
I.8.1. Secteur préparation isolation .....	12
I.8.2. Secteur de préparation des bobines .....	12
I.8.3. Secteur bobinage .....	13
I.9. Ateliers de montage .....	15
I.9.1. Secteur prés montage .....	15
I.9.2. Secteur montage final.....	15
I.10. Contrôle final .....	16
I.11. Normes.....	17
I.12. Conclusion .....	17

## Chapitre II : Généralités sur la construction des moteurs asynchrones

II.1. Introduction .....	18
II.2. Eléments constituant la machine asynchrone .....	18
II.2.1. Stator .....	19
II.2.2. Le rotor .....	20
II.2.3. Rotor bobiné .....	21
II.2.4. Rotor à simple cage.....	21
II.2.5. Rotor à double cage .....	22
II.3. Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone : .....	22
II.4. Effet de peau et moteur à double cage .....	24
II.5. Bobinage de la machine asynchrone .....	25
II.6. Les différents types d'enroulements .....	25
II.7. Matériaux dans les machines électriques .....	27
II.7.1. Matériaux magnétiques .....	27
II.7.2. Matériaux conducteurs.....	29
II.8. Isolation du bobinage.....	31
II.9. Classification des machines à cage d'écureuil .....	33
II.9.1. La différence entre les classes .....	35
II.10. Conclusion .....	36

## Chapitre III : Calcul et dimensionnement d'un MAS à double cage

III.1. Introduction .....	37
III.2. Méthodes de dimensionnement et calcul des machines électriques .....	37
III.2.1. Première Méthode .....	37
III.2.2. Deuxième Méthode.....	38
III.2.3. Troisième méthode « calcul de LIWSCHITZ » .....	38
III.2.4. Quatrième Méthode .....	38
III.3. Dimensionnement de la machine asynchrone double cage .....	38
III.3.1. Dimensions principales.....	38
III.3.2. Dimensionnement de l'enroulement statorique.....	40
III.3.3. Dimensionnement de la feuille statorique .....	41
III.3.4. Vérification des charges électromagnétique .....	42
III.3.5. Dimensionnement du rotor .....	42
III.3.6. Dimensionnement de la feuille rotorique .....	43
III.3.7. Dimensionnement de l'anneau.....	44
III.3.8. Calcul du circuit magnétique .....	45

III.3.8.1. la culasse statorique .....	45
III.3.8.2. les dents statorique.....	45
III.3.8.3. l'entrefer .....	46
III.3.8.4. la culasse rotorique .....	46
III.3.8.5. les dents de rotor.....	47
III.3.8.6. Force magnétomotrice totale par paire de pôles.....	47
III.3.8.7. Courant magnétisant .....	47
III.3.8.9. Réactance de magnétisation .....	47
III.3.8.10. Coefficient de dispersion magnétique du stator .....	47
III.3.8.11. Force électromotrice à vide $E_0$ .....	48
III.3.9. Calcul des paramètres électriques des enroulements.....	48
III.3.9.1. Paramètres statoriques .....	48
III.3.9.2. Paramètres rotoriques .....	50
III.4. Calcul des pertes et du rendement .....	51
III.4.1. Pertes principales dans le fer .....	52
III.4.2. Pertes électriques dans le cuivre .....	52
III.4.3. Le rendement de la machine .....	53
III.5. Application numérique .....	53
III.5.1. Présentation de la machine .....	53
III.5.2. Résultats .....	54
III.5.2.1. Paramètres principaux du stator.....	54
III.5.2.2. Paramètres de l'enroulement statorique .....	54
III.5.2.3. Paramètres de la feuille statorique .....	55
III.5.2.4. Vérification des paramètres électromagnétiques.....	55
III.5.2.5. Paramètres du circuit magnétique statorique .....	55
III.5.2.6. Les Paramètres électriques du stator.....	56
III.5.2.7. Paramètres principaux du rotor.....	56
III.5.2.8. Paramètres de la feuille rotorique .....	56
III.5.2.9. Paramètres de l'anneau .....	57
III.5.2.10. Paramètres du circuit magnétique rotorique.....	57
III.5.2.11. Les paramètres électriques du rotor .....	57
III.5.2.12. Les Paramètres globaux du circuit magnétique.....	58
III.5.2.13. Paramètres de l'entrefer .....	58
III.5.2.14. Pertes et de Rendement.....	59
III.6. Conclusion.....	59

## Chapitre IV : Analyse numérique d'un MAS de 250 kW

IV.1. Introduction.....	60
IV.2. Principe de la méthode des éléments finis.....	60
IV.3. La CAO des machines électriques.....	61
IV.3.1. Le Préprocesseur.....	62
IV.3.2. Le Processeur.....	63
IV.3.3. Le Post-processeur.....	63
IV.4. Equations de Maxwell.....	63
IV.5. Formulation $\vec{A} - V$ .....	64
IV.6. Présentation du logiciel Ansys-Maxwell.....	66
IV.7. Simulation de la machine.....	68
IV.8. La Courbe de première aimantation.....	70
IV.9. Essai à vide.....	70
IV.10. Essai en charge.....	72
IV.11. Induction dans l'entrefer.....	76
IV.12. Cartographies du champ.....	76
IV.13. Comparaison entre les valeurs analytiques et numériques.....	78
IV.14. Conclusion.....	79
Conclusion générale.....	80
Bibliographie.....	81
Annexes.....	83

# *Liste des figures*

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

## Chapitre II

Figure II. 1: Rotor et stator d'une machine asynchrone.....	19
Figure II. 2: Paquet statorique et stator bobiné .....	19
Figure II. 3: La disposition en biais des barres rotoriques .....	21
Figure II. 4: Rotor bobiné.....	21
Figure II. 5: Rotor à simple cage d'écureuil.....	22

Figure II. 6: Rotor à double cage d'écureuil .....	22
Figure II. 7: Variation et orientation du champ tournant dans une machine asynchrone .....	23
Figure II. 8: Variation et orientation du champ tournant avec les angles dans une machine asynchrone.....	24
Figure II. 9: Densité du courant au démarrage du moteur Distribution du courant après le régime transitoire.....	25
Figure II. 10: Bobinage d'une machine électrique .....	25
Figure II. 11: Schéma d'un enroulement concentrique .....	26
Figure II. 12: Schéma d'un enroulement imbriqué .....	26
Figure II. 13: Schéma d'un enroulement ondulé.....	26
Figure II. 14: Bobinages multipolaires.....	27
Figure II. 15: Image d'une isolation d'encoches.....	31
Figure II. 16: Différentes isolations dans l'encoche .....	32
Figure II. 17: Formes d'encoche rotorique pour différentes classes de moteur .....	34
Figure II. 18: Courbes couple/vitesse en fonction de la classe du moteur .....	35

### **Chapitre III**

Figure III. 1: Moteur asynchrone à double cage d'écureuil 250 kW .....	53
--	----

### **Chapitre IV**

Figure IV. 1: Eléments 2D triangulaires .....	60
Figure IV. 2: Éléments 2D carrés .....	61
Figure IV. 3: Organigramme de simulation.....	67
Figure IV. 4: Interface de logiciel Ansys-Maxwell .....	68
Figure IV. 5: Coupe transversale de la machine sous l'environnement Ansys-Maxwell .....	68
Figure IV. 6: Maillage de moteur .....	69
Figure IV. 7: Distribution de bobinage.....	69
Figure IV. 8: Courbe de première aimantation de la tôle magnétique utilisée à Electro-Industries .....	70
Figure IV. 9: Courants statoriques à vide .....	71
Figure IV. 10: Couple du moteur à vide .....	71
Figure IV. 11: Vitesse du moteur à vide.....	71
Figure IV. 12: Courants rotoriques à vide .....	72
Figure IV. 13: Courant statorique pour une charge de 1605.79 N.m .....	72

Figure IV. 14: Couple de moteur pour une charge 1605.79 N.m.....	73
Figure IV. 15: Vitesse du moteur pour une charge 1605.79 N.m .....	73
Figure IV. 16: Courant statorique pour une charge de 1200 N.m .....	73
Figure IV. 17: Couple de moteur pour une charge 1200 N.m.....	74
Figure IV. 18: Vitesse du moteur pour une charge 1200 N.m .....	74
Figure IV. 19: Courant statorique pour une charge de 800 N.m .....	74
Figure IV. 20: Couple de moteur pour une charge 800 N.m.....	75
Figure IV. 21: Vitesse du moteur pour une charge 800 N.m .....	75
Figure IV. 22: Distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer .....	76
Figure IV. 23: Les lignes de champ.....	77
Figure IV. 24: L'induction magnétique .....	77
Figure IV. 25: Densité de courant dans les barreaux rotoriques .....	78

# *Liste des tableaux*

# Liste des tableaux

## Chapitre II

Tableau II. 1: Caractéristiques de quelques matériaux magnétiques.....	28
Tableau II. 2: Caractéristiques de Quelques Matériaux Magnétiques Durs (aimants) .....	29
Tableau II. 3: Caractéristiques de Quelques Matériaux conducteurs Résistivité à 20°Celsius .....	30
Tableau II. 4: Classification des Matériaux d'Isolants.....	33

## Chapitre III

Tableau III. 1 : Cahier de charge de la machine étudiée.....	53
Tableau III. 2: Paramètres principaux de stator .....	54
Tableau III. 3: Paramètres de l'enroulement statorique .....	54
Tableau III. 4: paramètres de la feuille statorique.....	55
Tableau III. 5: Vérification des paramètres électromagnétiques.....	55
Tableau III. 6: Paramètres du circuit magnétique statorique.....	55
Tableau III. 7: Paramètres électriques du stator.....	56
Tableau III. 8: Paramètres principaux du rotor .....	56
Tableau III. 9: Paramètres de la feuille rotorique .....	56
Tableau III. 10: Paramètres de l'anneau .....	57
Tableau III. 11: Paramètres du circuit magnétique rotorique.....	57
Tableau III. 12: Paramètres électrique du rotor .....	57
Tableau III. 13: Paramètres globaux du circuit magnétique .....	58
Tableau III. 14: Paramètres de l'entrefer .....	58
Tableau III. 15: Pertes et le rendement .....	59

## Chapitre IV

Tableau IV.1: Comparaison entre les valeurs analytique et numérique.....	78
--	----

# *Liste des symboles*

## Liste des symboles

$A_1$  : Charge linéaire.

$a_1$  : Nombre de voies parallèle.

$B_{c1}$  : Induction magnétique dans le dos du stator.

$B_{c2}$  : Induction dans la culasse rotorique.

$B_{z1max}$  : Induction maximale dans la dent statorique.

$B_{z2max}$  : Induction admissible dans la dent rotorique.

$B_\delta$  : Induction dans l'entrefer.

$b_{1moy}$  : Largeur moyenne d'une section.

$b_{an}$  : Largeur de l'anneau.

$b_{enc11}$  : Largeur minimale de l'encoche statorique.

$b_{enc12}$  : Largeur maximale de l'encoche statorique.

$b_{f1}$  : Largeur de la fente statorique.

$b_{f2}$  : Largeur de la fente rotorique.

$b_{z1}$  : Largeur de la dent statorique.

$b_{z2}$  : Largeur de la dent rotorique.

$D_{an}$  : Diamètre moyen de l'anneau.

$D_{ext1}$  : Diamètre extérieur du stator.

$D_{ext2}$  : Diamètre extérieur du rotor.

$D_{int1}$  : Diamètre intérieur du stator.

$D_{int2}$  : Diamètre intérieur du rotor.

$d_{21}$  : Diamètre maximal de l'encoche rotorique.

$d_{22}$  : Diamètre minimale de l'encoche rotorique.

$d_{iso}$  : Diamètre de conducteurs avec isolation.

$E_0$  : Force électromotrice à vide.

$F_{c1}$  : Force magnétomotrice de la culasse statorique.

$F_{c2}$  : Force magnétomotrice dans la culasse du rotor.

$F_{z1}$  : Force magnétomotrice dans la dent du stator.

$F_{z2}$  : Force magnétomotrice dans la dent du rotor.

$F_{\delta}$  : Force magnétomotrice dans l'entrefer.

$F$  : Force magnétomotrice totale par paire de pôles.

$f_1$  : La fréquence.

$h_2$  : La hauteur entre les axes de l'encoche.

$h_{an}$  : Hauteur de l'anneau.

$h_{c1}$  : La hauteur du dos du stator.

$h_{c2}$  : Hauteur de la culasse rotorique.

$h_{enc1}$  : Hauteur de l'encoche statorique.

$h_{enc2}$  : La hauteur de l'encoche rotorique.

$h_{f1}$  : Hauteur de fente d'encoche statorique.

$h_{f2}$  : Hauteur de la fente de l'encoche rotorique.

$h_{z1}$  : Hauteur de la dent statorique.

$h_{z2}$  : Hauteur de la dent rotorique .

$H_{c2}$  : Intensité du champ magnétique dans la culasse rotorique.

$H_{z1}$  : Intensité du champ magnétique qui correspond à l'induction  $B_{z1}$ .

$H_{z2}$  : Intensité du champ magnétique dans la culasse rotorique.

$I_0$  : Le courant total à vide.

$I_{0r}$  : Le courant magnétisant à vide.

$I_2$  : Courant dans la barre rotorique.

$I_{n1}$  : Courant nominal.

$I_{\mu}$  : Courant magnétisant.

$I_{0a}$  : Courant à vide active.

$j_b$  : Densité du courant rotorique.

$J_1$  : Densité du courant dans l'enroulement statorique.

$K_e$  : Facteur de majoration.

$K_{en1}$  : Facteur de bobinage de l'enroulement statorique.

$K_{fer}$  : Coefficient de remplissage du paquet de tôles statorique et rotorique.

$K_{\delta}$  : Coefficient de CARTER qui tien compte de la non-uniformité de l'entrefer.

$k_{d1}$  : Facteur de distribution.

$k_f$  : Facteur de forme de la courbe d'induction.

$k_i$  : Coefficient d'inclinant.

$k_{r1}$  : Coefficient de raccourcissement.

$k_{re1}$  : Coefficient de remplissage.

$L_{W1}$  : Longueur moyenne d'une spire de l'enroulement statorique.

$L_{c1}$  : Longueur moyenne des lignes de champs dans la culasse statorique.

$L_{c2}$  : Longueur moyenne des lignes du champ magnétique dans la culasse du rotor.

$L_{f1}$  : Longueur moyenne de la partie frontale d'une demi-spire.

$l_i$  : Longueur virtuelle de l'induit.

$l_2$  : Longueur virtuelle de paquet rotorique.

$m_1$  : Nombre de phase statorique.

$m_2$  : Nombre de phase rotorique.

$n_s$  : Vitesse de rotation de synchronisme.

$p$  : Nombre de pole.

$P_{a10}$  : Puissance à vide.

$P_e$  : Puissance électromagnétique.

$P_n$  : La puissance nominale de la machine.

$p_{j1}$  : Pertes joules statorique.

$p_{j2}$  : Pertes joules rotorique.

$p_{fc1}$  : Pertes dans la culasse statorique.

$p_{fz1}$  : Pertes dans les dents.

$p_{fer}$  : Pertes fer.

$p_{mec}$  : Pertes mécanique.

$p_{sup}$  : Pertes supplémentaires.

$p_t$  : Pertes totales.

$q_1$  : Le nombre d'encoche par pôle et par phase.

$R_1$  : Résistance d'une phase de l'enroulement statorique.

$R_2$  : Résistance d'une phase rotorique.

$R_{2ram}$  : Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator.

$R_{an}$  : Résistance de l'anneau.

$R_b$  : Résistance active de la barre.

$R_{anramb}$  : Résistance de l'anneau ramenée à la barre.

$R_m$  : La résistance de magnétisation.

$S_{an}$  : Section de l'anneau.

$S_b$  : Section de la barre.

$S_{eff1}$  : Section effective transversale d'un conducteur de l'enroulement.

$S_{elt1}$  : La section élémentaire.

$S_{en1}$  : Section de l'encoche statorique.

$S_{iso}$  : Section occupée par l'isolation.

$t_1$  : Le pas dentaire statorique.

$t_2$  : Pas dentaire rotorique.

$U_{en1}$  : Nombre de conducteurs effectifs dans une encoche.

$U_{n1}$  : Tension nominale.

$W_1$  : Nombre de spire d'une voie parallèle.

$X_1$  : La réactance totale.

$X_2$  : Résistance active d'une phase rotorique.

$X_{1d}$  : Réactance de fuite différentielle.

$X_{1f}$  : Réactance de fuite frontale.

$X_{enc1}$  : Réactance de fuite d'encoche.

$X_m$  : Réactance de magnétisation.

$X_{2ram}$  : La réactance du rotor ramenée au stator.

$y_1$  : Pas d'enroulement.

$z_2$  : Le nombre d'encoches rotorique.

$z_1$  : Nombre d'encoches statorique.

$\cos\varphi_n$  : Facteur de puissance nominal de la machine.

$\alpha$  : La zone de phase.

$\alpha_i$  : Coefficient de recouvrement polaire.

$\beta$  : Rapport de raccourcissement.

$\delta$  : Epaisseur de l'isolant.

$\lambda_1$  : Perméance de dispersion de l'enroulement statorique.

$\lambda_{1d}$  : Coefficient de Perméance différentielle statorique.

$\lambda_{enc1}$  : Coefficient de Perméance d'encoche statorique.

$\rho_{cu}$  : Résistivité du cuivre.

$\sigma_\mu$  : Coefficient de dispersion magnétique du stator.

$\tau_{p1}$  : Le pas polaire statorique.

$\tau_{p2}$  : Pas polaire rotorique.

$\varepsilon$  : Raccourcissement.

$\Phi$  : Flux sous un pôle.

$\gamma$  : Angle électrique.

$\eta_n$  : Le rendement de la machine.

# *Introduction générale*

# Introduction générale

Dans le vaste champ de l'électrotechnique, une des plus anciennes disciplines est la construction des machines électriques. En fait les premières tentatives de construction de machines électriques commencèrent avec la découverte des phénomènes d'induction et la mise en évidence des forces issues de l'interaction entre les champs électromagnétiques et les courants de conduction (Lois : Lenz, Laplace, Faraday etc....) [1].

Le domaine de conception des machines électriques est l'une des plus prestigieuses découvertes du siècle dernier et reste aujourd'hui un thème de recherche très prisé par les laboratoires de recherche. L'objectif visé par cette recherche est toujours l'optimisation et la conception de nouvelles machines adaptées à la demande du marché [2].

La caractérisation de ces machines entraîne à formuler des méthodes de dimensionnement qui s'appuie sur les formules empiriques tenant compte des divers phénomènes électromagnétiques et qui aboutit à une définition globale des caractéristiques géométriques et électromagnétiques des machines, les résultats obtenus sont par la suite simulés grâce à l'outil de conception assistée par ordinateur (CAO).

Un outil de CAO est un moyen de simulation permettant la définition de la structure du dispositif à concevoir, son dimensionnement et la détermination de ses performances à partir de ces spécifications géométriques, de construction et des conditions d'utilisation. En partant d'un cahier de charges donné, il permet d'explorer automatiquement l'ensemble des solutions possibles.

Dans ce mémoire, on s'intéresse à la conception d'un moteur asynchrone à double cage de 250 kW en cours de construction à l'entreprise Electro-Industries. Cette conception présente un cheminement qui discerne un calcul analytique suivi d'une modélisation numérique usant d'un logiciel de CAO performant.

La partie du calcul analytique utilise la méthode classique de Liwschitz pour le dimensionnement et l'obtention des différents paramètres géométriques et électromagnétiques ainsi que les caractéristiques estimées suite aux contraintes imposées par le cahier des charges. Ensuite vient la simulation du moteur préalablement dimensionné en utilisant le logiciel de C.A.O "Ansys-Maxwell", qui se sert de la méthode des éléments finis pour la simulation des dispositifs électromagnétiques.

Le 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 les moteurs asynchrones, à savoir ses composants principaux ainsi que son principe de fonctionnement. Nous exposerons aussi les différentes classes de ces moteurs adoptées par la NEMA.

Le troisième chapitre, traitera le calcul analytique d'un moteur asynchrone à double cage. Le calcul utilise la méthode de Liwschitz pour le dimensionnement et l'obtention des différents paramètres géométriques et électriques ainsi que les caractéristiques estimées suite aux contraintes imposées par le cahier des charges.

Le quatrième et dernier chapitre, est consacré à l'analyse numérique des performances électro-magnéto-dynamiques du moteur étudié. A la fin du chapitre, nous dressons un tableau comparatif entre les résultats analytiques et numériques.

Enfin nous présentons 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 [3].

**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 [3].

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

L'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'encocher 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

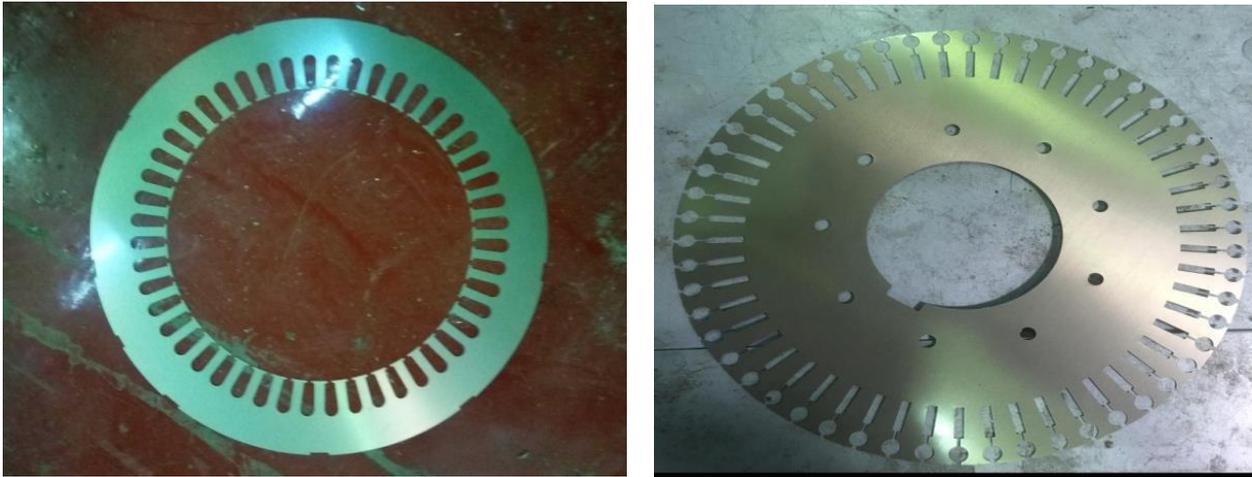


Figure I. 5: Tôles statoriques et rotoriques

### I.5.2. Empaquetage

- **Empaquetage du paquet 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 [4].

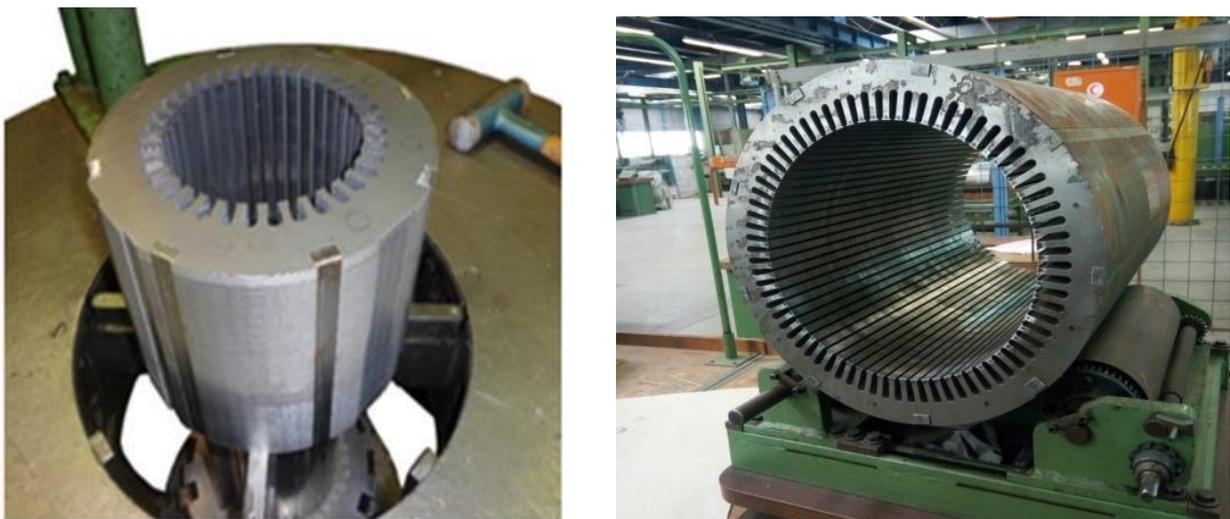


Figure I. 6: Paquet statoriques

- **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 [4].



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), boites à bornes, couvercles de boite 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 [5].



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.

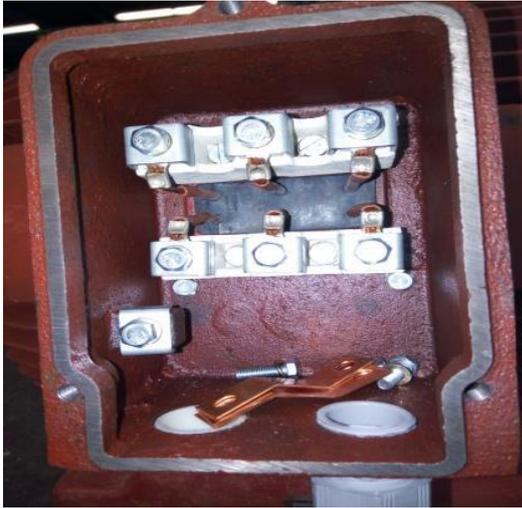


Figure I. 17: Boite à bornes en fonte usinée



Figure I. 18: Boite 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 d'encoche isolés



Figure I. 22: Bobinage automatique

**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 [6] :

- 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 au 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 des moteurs asynchrones*

**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 domaines en l'occurrence l'aéronautique, la robotique et dans certains mécanismes industriels à haute précision [7].

On se propose, dans cette partie, de donner quelques précisions sur les éléments de construction des machines asynchrones. Cette description va nous permettre de comprendre de quelle façon le système est réalisé physiquement.

**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 [8].

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 [9].

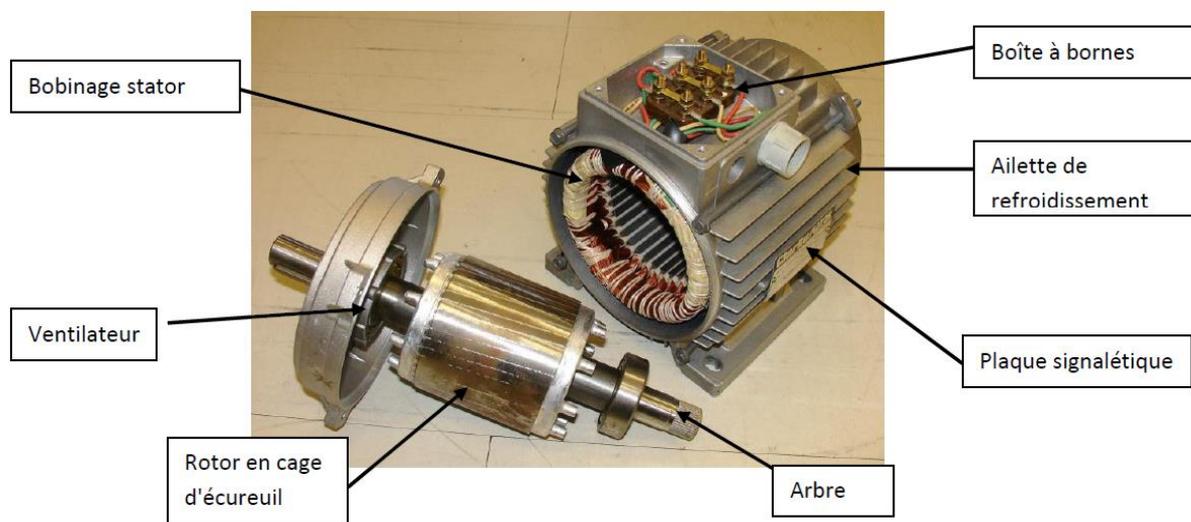


Figure II. 1: Rotor et stator d'une machine asynchrone

### 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 [9].

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 [10].

### **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 [11].

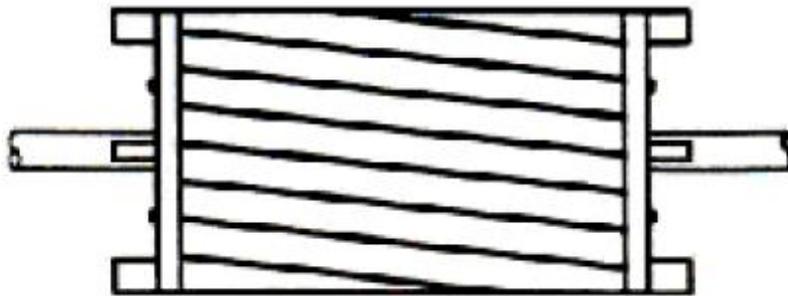


Figure II. 3: La disposition en biais des barres rotoriques

### 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.2.4. Rotor à simple cage

Le circuit du rotor est basé sur le fait qu'il est constitué de barres en nombre convenable, conductrices (cuivre, laiton, aluminium...), disposées à la périphérie du rotor dans des encoches régulièrement espacées, et réunies à leur extrémités par deux anneaux conducteurs appelées couronnes de court-circuit d'assez forte section. L'ensemble ressemble à une cage d'écureuil.

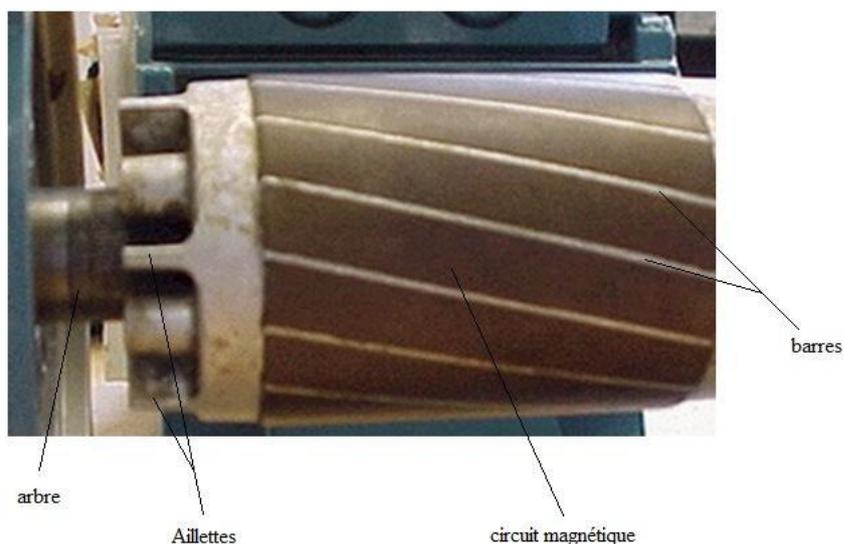


Figure II. 5: Rotor à simple cage d'écureuil

### II.2.5. Rotor à double cage

Le rotor comporte deux cages, l'une est réalisée en laiton ou en bronze, externe à résistance élevée (par le choix de la section et du matériau), placée près de l'entrefer (et donc de faible réactance de fuite). L'autre en cuivre plus profonde, de faible résistance et de forte réactance de fuites due notamment à la présence de l'isthme d'air entre les deux barres.

Les deux cages, soumises à des variations de flux de même pulsation, peuvent être considérées du point de vue électromagnétique comme mise en parallèles [12-13].

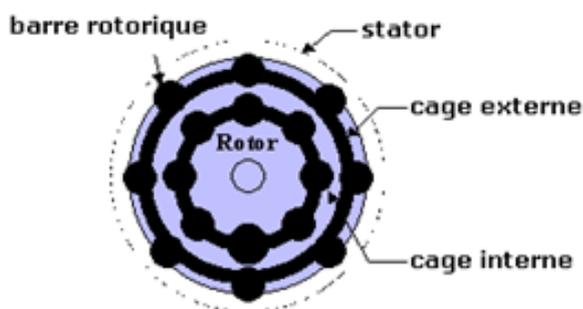


Figure II. 6: Rotor à double cage d'écureuil

### 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. 7). 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 [8].

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. 8). 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 [14].

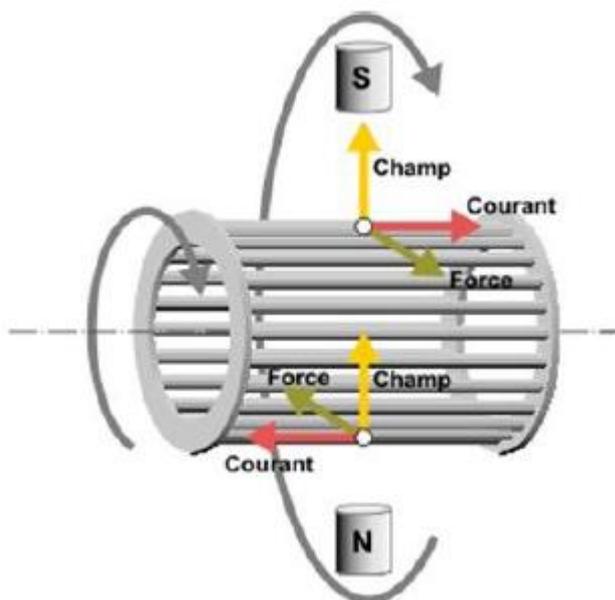


Figure II. 7: Variation et orientation du champ tournant dans une machine asynchrone

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.

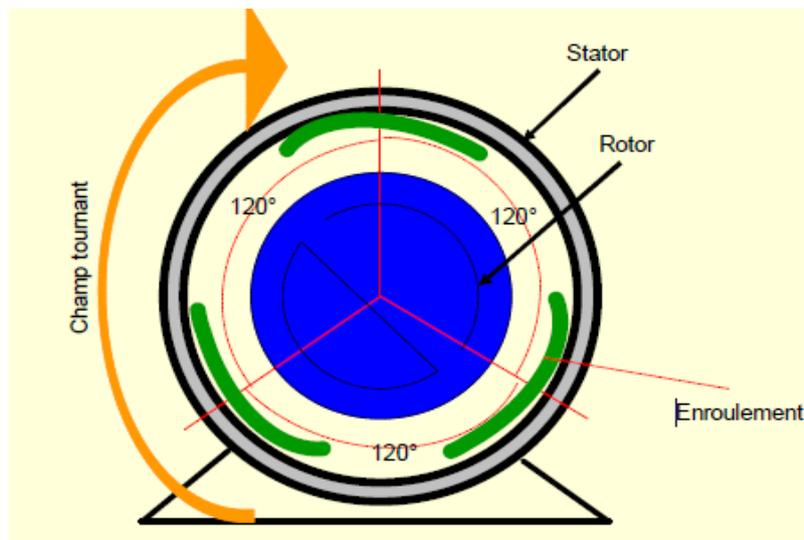


Figure II. 8: Variation et orientation du champ tournant avec les angles dans une machine asynchrone

#### II.4. Effet de peau et moteur à double cage

La définition globale de l'effet de peau est la distribution non uniforme du courant électrique dans un conducteur. La densité du courant est concentrée vers la surface du conducteur et décroît autant plus rapidement que la fréquence est élevée. Lorsque la fréquence augmente la profondeur  $\delta$  de pénétration du champs ou bien du courant diminue selon l'expression suivante :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma\mu\omega}} \quad (\text{II.1})$$

$\sigma$  : Conductivité électrique du matériau .

$\mu$  : Perméabilité magnétique du matériau.

$\omega$  : Pulsation des courants.

L'effet de peau se manifeste d'autant plus que la fréquence est élevée. Cette propriété est utilisé dans les cages des moteurs asynchrones, au démarrage, on cherche une forte résistance rotorique, donc un courant concentré vers l'entrefer de la machine, tant dit que lorsque le régime nominal est atteint, on recherche plutôt une faible résistance, c'est-à-dire un courant uniformément répartie dans le conducteur. Ces considérations on conduit les chercheurs à étudier et à imaginer des formes d'encoche rotorique plus adaptées aux caractéristiques recherchées. La (figure II. 9) suivantes montrent ce phénomène pour un rotor à double encoche [15].

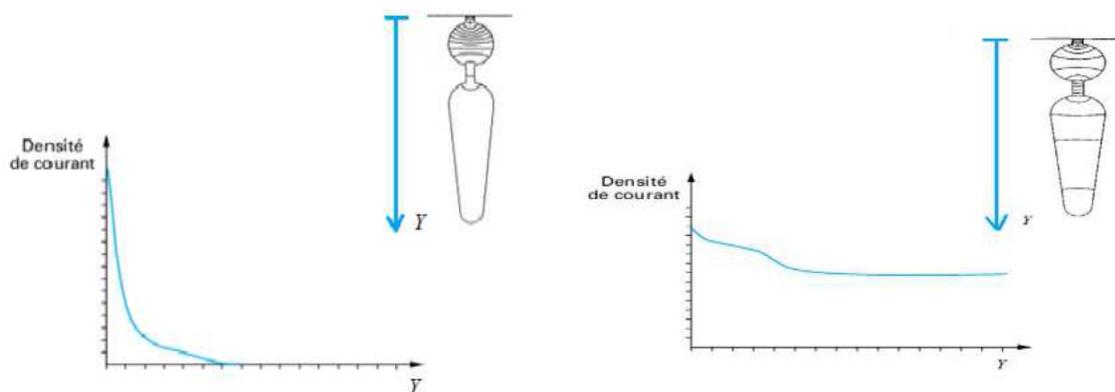


Figure II. 9: Densité du courant au démarrage du moteur et Distribution du courant après le régime transitoire

### 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 [16].

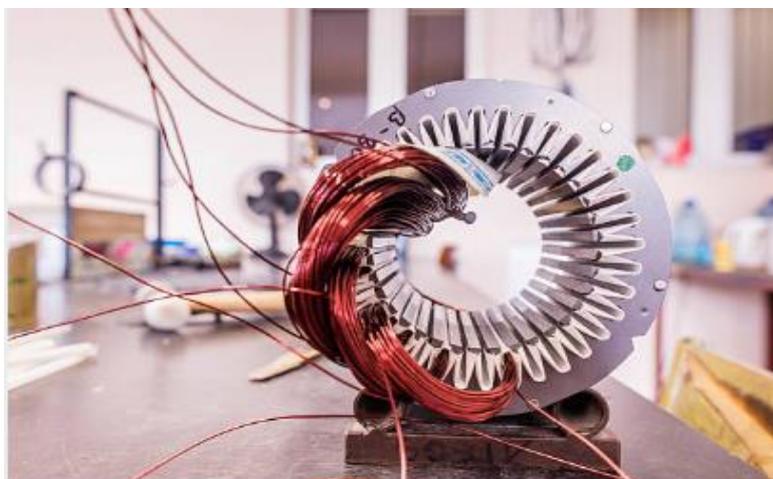


Figure II. 10: Bobinage d'une machine électrique

### II.6. Les différents types d'enroulements

On distingue trois types de bobinage: concentrique, imbriqué et ondulé. L'enroulement concentrique (figure II.11) 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.12) est beaucoup employé dans les gros moteurs, alors que l'ondulé (figure. II.13), son utilisation est limitée dans les rotors. Les enroulements imbriqués et ondulés peuvent être à simple ou double couche, dans le cas de la configuration double couches, le nombre de conducteurs est très souvent pair [17].

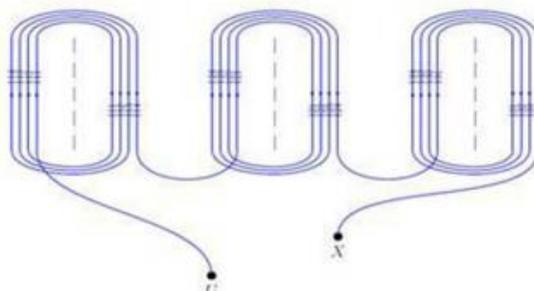


Figure II. 11: Schéma d'un enroulement concentrique

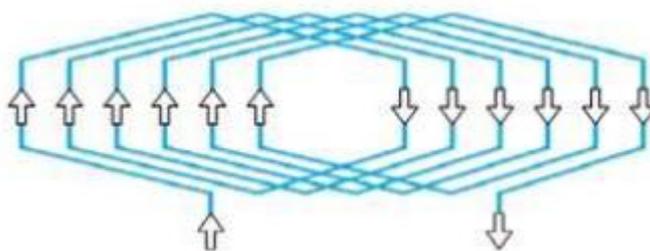


Figure II. 12: Schéma d'un enroulement imbriqué

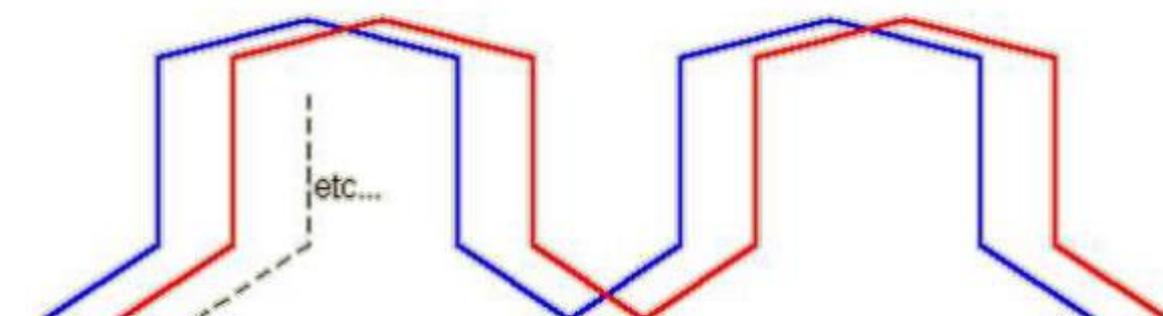


Figure II. 13: Schéma d'un enroulement ondulé

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.14).

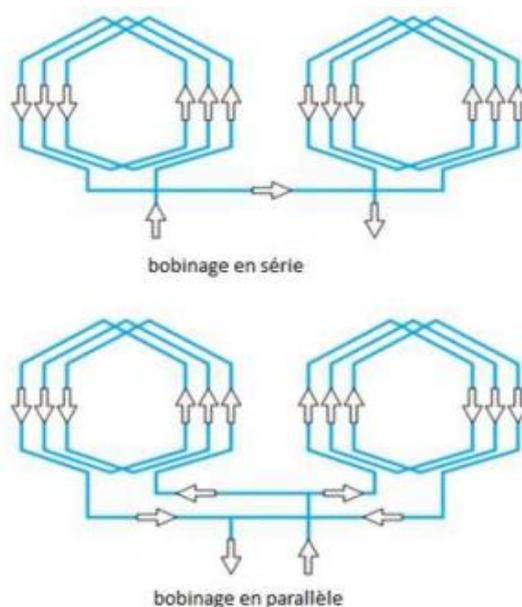


Figure II. 14: Bobinages multipolaires

## 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 [18].

### 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 :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M} \quad (\text{II.2})$$

$\mu_0 \vec{H}$  : 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.

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

**Tableau II. 1: Caractéristiques de quelques matériaux magnétiques**

- Par contre, un matériau magnétique dur est caractérisé par une perméabilité relative faible ( $\mu_r \approx 1$ ) et un champ coercitif élevé [19].

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.

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

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

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 [18].

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 [8].

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 [8].

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.

$$\rho(T) = \rho_0(t + \alpha\Delta T) \quad (\text{II.3})$$

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

Matériaux	$\rho_0$ en $10^{-8}$ $\Omega \cdot m$	$\alpha$	
		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

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

### 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. 15: Image d'une isolation d'encoche

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 [14].

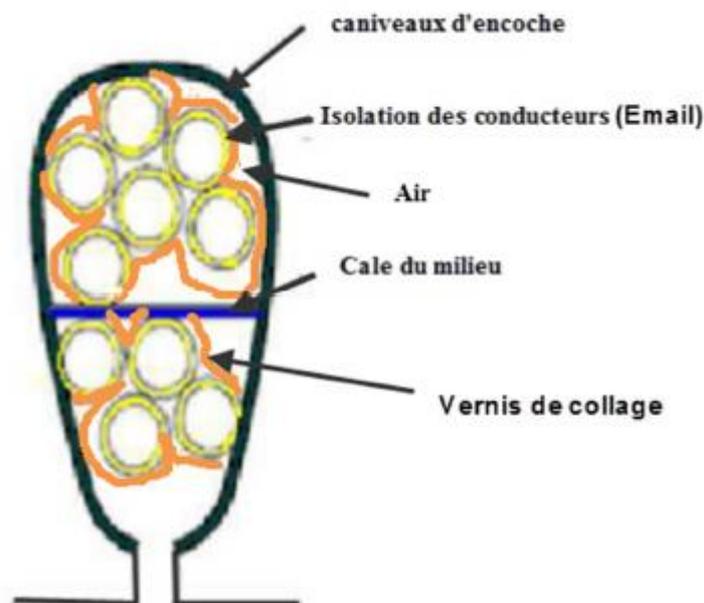


Figure II. 16: Différentes isolations dans l'encoche

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 [8].

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 [16].

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

Tableau II. 4: Classification des Matériaux d'Isolants

### II.9. Classification des machines à cage d'écureuil

Selon le critère de la NEMA ([www.nema.org](http://www.nema.org)), on peut classifier les moteurs à cage d'écureuil selon la variation de la résistance et de la réactance des enroulements du rotor. Au démarrage, la réactance d'un conducteur est d'autant plus grande que ce dernier est loin de l'entrefer [1].

La résistance dépend de la longueur du rotor, de la section des conducteurs et du matériau utilisé. Plus cette résistance est grande, plus le courant de démarrage est petit.

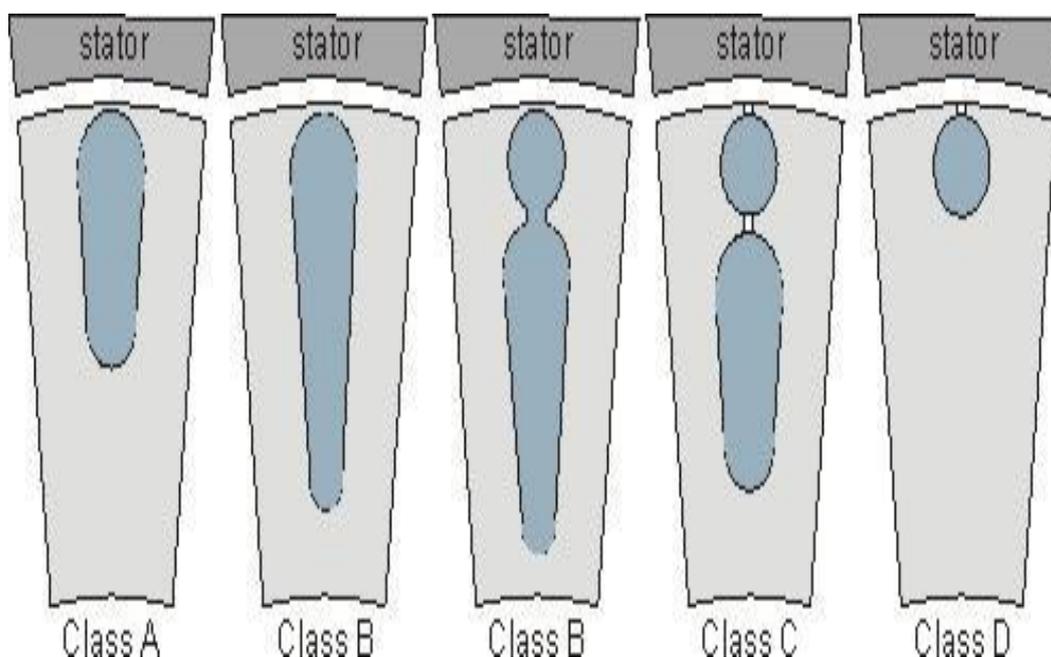


Figure II. 17: Formes d'encoche rotorique pour différentes classes de moteur

Selon NEMA, on peut classier le moteur asynchrone comme suit :

Classe A : Moteurs à couple normal et à courant de démarrage normal

Classe B : Moteurs à couple normal et à faible courant de démarrage

Classe C : Moteurs à fort couple et à faible courant de démarrage

Classe D : Moteurs à fort glissement

Classe F : Moteurs à faible couple et à faible courant de démarrage

Cette classification se base sur la variation de la résistance et de la réactance des enroulements du rotor. Au démarrage, la réactance d'un conducteur est d'autant plus grande que ce dernier est loin de l'entrefer [20].

La résistance dépend de la longueur du rotor, de la section des conducteurs et du matériau utilisé. Plus cette résistance est grande, plus le courant de démarrage est petit et meilleur est le couple de démarrage, jusqu'à une certaine limite, bien entendu [20].

Pour avoir l'idée de la manière dont cette classification a été établie, il suffit juste de se baser sur la variation de la résistance et la réactance de l'enroulement du rotor. Au démarrage, la réactance d'un conducteur est d'autant plus grande que ce dernier est loin de l'entrefer. La résistance dépend de la longueur du rotor, de la section des conducteurs et du matériau utilisé.

Plus cette résistance est grande, plus le courant de démarrage est petit et meilleur est le couple de démarrage, jusqu'à une certaine limite. Il est donc possible d'expliquer les

différentes caractéristiques obtenues pour les diverses classes. La figure. II. 18 montre le développement du couple/vitesse pour les 5 types de moteurs.

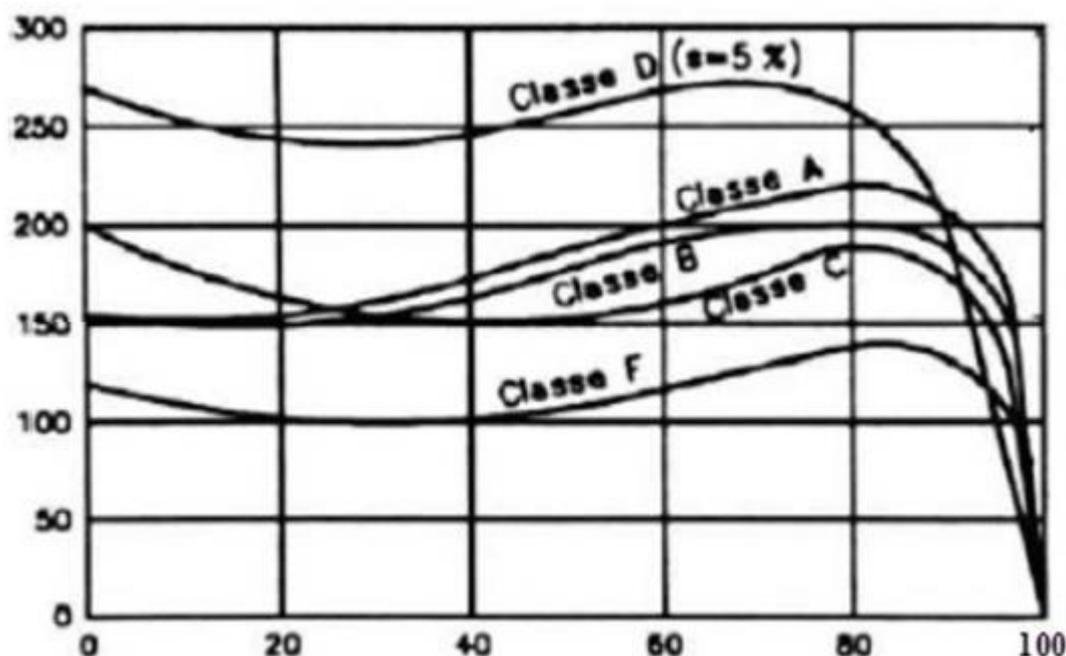


Figure II. 18: Courbes couple/vitesse en fonction de la classe du moteur

### II.9.1. La différence entre les classes

Pour la classe A l'encoche du rotor n'est pas tellement creuse et l'enroulement se caractérise par une faible résistance et dont le couple est normal, le courant de démarrage est suffisamment élevé et ce type de moteur ne se fabrique plus.

Les moteurs de classe B sont les plus utilisés ils se caractérisent par des encoches profondes et étroites et lors du démarrage la résistance est plus forte dans le bas du conducteur et cela force le courant à passer surtout dans le haut du conducteur et ce dernier se trouve limité lorsque le moteur démarre à pleine tension et c'est ça l'avantage par rapport au moteur de classe A [1].

Les moteurs de classe C sont les moteurs dont le rotor est à double cage (c'est notre cas d'étude) ils sont construits différemment, leur principe consiste à placer un enroulement de forte résistance près de l'entrefer et un enroulement de faible résistance loin de la surface. En durant le démarrage, le conducteur éloigné de l'entrefer a une grande résistance ce qui force le courant à passer dans le conducteur extérieur courant et donc faible mais le couple fort [2].

Lorsque le rotor atteint sa pleine vitesse, la résistance du conducteur qui se situe loin de l'entrefer devient faible et cela engendre une répartition uniforme du courant dans le conducteur.

Les moteurs des classe D se caractérisent par enroulement d'une grande résistance en raison de sa faible section, ce qui lui confère un fort couple de démarrage ainsi qu'un faible courant. Les moteurs de classe F sont des moteurs dont les conducteurs du rotor sont placés loin de l'entrefer ; au démarrage la résistance est grande, le courant est faible mais le circuit est très inductif et le couple est plutôt faible.

### **II.10. Conclusion**

Une présentation de la machines asynchrone a été faite au cours de ce chapitre, commençant avec les éléments de construction de la machine, les différents types de bobinage et les matériaux rentrant dans sa construction. Par la suite, nous nous sommes intéressés au principe de fonctionnement du moteur asynchrone ainsi que les différentes catégories de ce dernier selon la classification NEMA.

# *Chapitre III*

## *Calcul et dimensionnement d'un MAS à double cage*

**III.1. Introduction**

Les principaux paramètres du dimensionnement d'une machine asynchrone sont géométriques (diamètre d'alésage, longueur utile, dimensions des encoches), électriques (densité de courant et charge linéique ...), magnétiques (induction dans l'entrefer et dans les différents tronçons de la machine) et mécaniques (entrefer et vitesse de rotation). Chacun de ces paramètres a une importance lors du dimensionnement. Cependant du fait de leurs dépendances, nous sommes obligés de faire des compromis suivant les exigences prioritaires de fonctionnement et du cahier de charge.

**III.2. Méthodes de dimensionnement et calcul des machines électriques**

Ils existent plusieurs méthodes pour le dimensionnement des machines électriques, c'est un domaine très large dont l'approche utilise beaucoup d'hypothèses.

Tout au long de notre recherche nous nous sommes trouvés devant plusieurs sortes de procédés propres à chacun des concepteurs, la méthode en général ne change pas puisque on remarque toujours un même cheminement qui autorise à dimensionner le stator suivi par un calcul du rotor [2].

Dans ce qui suit, nous rapportons, quatre méthodes de calcul non exhaustives rencontrées dans notre recherche bibliographique :

**III.2.1. Première Méthode**

Cette méthode proposée par Marcel JUFER et Jean-Claude SABONNADIÈRE, repose sur le calcul en utilisant pour commencer les formules de dimensionnement du Fer statorique ensuite ils entament le calcul rotorique Le dimensionnement du circuit magnétique, est basé sur les contraintes suivantes :

- Imposer un niveau d'induction correspondant au coude de saturation de façon à limité les chutes de potentiel et les pertes fer, tout en diminuant le volume et la masse du fer puis définir ce niveau d'induction par la géométrie et le principe de conservation du flux magnétique.
- Le diamètre d'alésage et la longueur active sont les dimensions caractéristiques du processus de dimensionnement. Mais le facteur clé associé est l'induction radiale dans l'entrefer, sa distribution sera admise sinusoïdale [2].

### III.2.2. Deuxième Méthode

Cette deuxième méthode à caractère pédagogique utilisé à l'école polytechnique de MONREAL est une méthode à but didactique, La méthode suggérée offre une certaine marge de manœuvres, des compromis doivent être faits pour le choix de certains paramètres comme le diamètre d'alésage du moteur par exemple, le résultat obtenu doit quelque fois faire l'objet de changement afin de satisfaire les exigences visées, Cette méthode inclue aussi les dispersions due à la disposition en biais des encoches rotoriques.

### III.2.3. Troisième méthode « calcul de LIWSCHITZ »

Cette méthode est appelé la méthode de calcul de Liwschitz, elle permet le dimensionnement complet de la machine sur la base de formules empiriques [21].

### III.2.4. Quatrième Méthode

Cette procédure réuni le calcul et la conception assistée par ordinateur d'une machine à induction, et emprunte différentes phases de calcul suivant un ordre chronologique. Cette approche est basée sur le principe de conception de G.KOUSKOFF et LIWSCHITZ. Sauf qu'on impose les données géométriques d'une machine industrielle déjà existante, comme contraintes auxquelles nous devons nous soumettre.

Les résultats numériques du calcul sont comparés avec ceux donnés par la méthode des essais classiques puis traités par une analyse dynamique simulée du comportement de la machine en vue de mettre au point la corrélation et la concordance de ces résultats de conception avec ceux délivrés par le constructeur du moteur à induction étudié [2].

## III.3. Dimensionnement de la machine asynchrone double cage

Nous déterminons les dimensions géométriques des différentes parties du moteur ainsi que les grandeurs électromagnétiques tout en respectant les critères techniques exigés par le cahier de charges [22].

### III.3.1. Dimensions principales

#### a) Puissance électromagnétique

C'est la puissance transmise du stator vers le rotor à travers l'entrefer, elle est donnée par la formule suivante :

$$P_e = k_e \cdot \frac{P_n}{\cos\varphi_n \cdot \eta_n} \quad (\text{III.1})$$

Avec:

$$k_e = 0,98 - 0.005p \quad (\text{III.2})$$

**b) Longueur virtuelle de l'induit**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$l_i = \frac{6.1.P_e.10^{12}}{\alpha_i.k_f.N_s.D_{int1}^2.A_1.B_\delta.K_{en1}} \quad (\text{III.3})$$

**c) Coefficient de recouvrement polaire virtuel :**

$$\alpha_i = \frac{2}{\pi} \quad (\text{III.4})$$

**d) Facteur de la forme de la courbe de l'induction magnétique dans l'entrefer :**

$$k_f = 1.11 \quad (\text{III.5})$$

**e) Facteur de bobinage**

Le facteur de bobinage statorique  $k_{en1}$  devient

$$k_{en1} = k_{d1} \cdot k_{r1} \cdot k_i \quad (\text{III.6})$$

$k_i = 1$  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 :

$$k_{d1} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2.m}\right)}{q.\sin\left(\frac{\pi}{2.m.q}\right)} \quad (\text{III.7})$$

- Coefficient de raccourcissement**

Le Coefficient de raccourcissement  $k_r$  est défini par :

$$K_{r1} = \sin\left(\frac{\beta.\pi}{2}\right) \quad (\text{III.8})$$

Avec :

$$\beta = \frac{y}{\tau} \quad (\text{III.9})$$

et :

$$\tau = \frac{z_1}{2.p} \quad (\text{III.10})$$

### III.3.2. Dimensionnement de l'enroulement statorique

#### a) Courant nominal dans une phase statorique

Le courant nominal peut être calculé à partir de la relation ci-dessous :

$$I_{n1} = \frac{P_n \cdot 10^3}{m_1 \cdot U_{en1} \cdot \eta_n \cdot \cos \varphi_n} \quad (\text{III.11})$$

#### b) Nombre de conducteurs effectifs dans une encoche

Le nombre de conducteurs effectifs dans une encoche est donné par la formule suivante :

$$U_{en1} = \frac{A_1 \cdot a_1 \cdot t_1 \cdot 10^{-3}}{I_{n1}} \quad (\text{III.12})$$

Le pas dentaire est défini comme étant la distance séparant deux axes d'encoches voisines il est donné par la relation suivante :

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_{int1}}{z_1} \quad (\text{III.13})$$

#### c) Pas polaire en nombre d'encoches

Elle est donnée par la formule suivante :

$$\tau_{p1} = \frac{z_1}{2p} \quad (\text{III.14})$$

#### d) Nombre de spire d'une voie parallèle

Donné par la formule suivante :

$$W_1 = \frac{p \cdot q_1 \cdot U_{en1}}{a_1} \quad (\text{III.15})$$

#### e) Section effective transversale d'un conducteur de l'enroulement

Elle est calculée par l'expression suivante :

$$S_{eff1} = \frac{I_{n1}}{a_1 \cdot J_1} \quad (\text{III.16})$$

### III.3.3. Dimensionnement de la feuille statorique

#### a) Largeur de la dent

La largeur de la dent est calculée à partir de la loi de conservation du flux à travers le pas dentaire, elle est donnée comme suit :

$$b_{z1} = \frac{t_1 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{z1max}} \quad (III.17)$$

#### b) La hauteur du dos du stator

La hauteur du dos du stator est donnée par la formule suivante :

$$h_{c1} = \frac{0,5 \cdot \alpha_i \cdot \tau_{p1} \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{c1}} \quad (III.18)$$

#### c) La hauteur de la dent

La hauteur de la dent est donnée par la formule suivante :

$$h_{z1} = 0,5(D_{ext1} - D_{int1}) - h_{c1} \quad (III.19)$$

#### d) Largeur minimale de l'encoche

La largeur minimale de l'encoche est donnée par l'expression suivante :

$$b_{enc11} = \frac{\pi \cdot (D_{int1} + 0,2 \cdot h_{z1})}{z_1} - b_{z1} \quad (III.20)$$

#### e) Largeur maximale de l'encoche

La longueur maximale de l'encoche est donnée par la formule suivante :

$$b_{enc12} = \frac{\pi \cdot (D_{int1} + 2 \cdot h_{z1})}{z_1} - b_{z1} \quad (III.21)$$

#### f) Hauteur de l'encoche

La hauteur de l'encoche est donnée par la formule suivante :

$$h_1 = h_{z1} - h_{f1} - h_{k1} \quad (III.22)$$

#### g) Section de l'encoche statorique

La section occupée par les conducteurs est donnée par la relation suivante :

$$S_{en1} = 0,5 \cdot (b_{enc11} + b_{enc12}) \cdot h_1 + \frac{\pi \cdot b_{enc12}^2}{8} - S_{iso} \quad (III.23)$$

#### h) Section occupée par les conducteurs

$$S_{iso} = 0,5 \cdot \left( \pi \cdot \frac{b_{enc12}}{2} + 2 \cdot h_1 + b_{enc11} \right) \cdot \delta \quad (III.24)$$

### i) Coefficient de remplissage

Le coefficient de remplissage est défini comme étant le rapport de la section des conducteurs occupant l'encoche à la section utile de l'encoche, il doit varier dans l'intervalle (0,7-0,75), il est donné par l'expression suivante :

$$k_{re1} = \frac{U_{en1}(d_{iso1}^2 \cdot N_{elt1} + d_{iso2}^2 \cdot N_{elt2})}{S_{en1}} \quad (III.25)$$

### III.3.4. Vérification des charges électromagnétique

Après avoir calculé le nombre de conducteurs effectifs dans une encoche et choisi la section normalisée, on passera à la vérification de la charge linéaire  $A_1$ .

L'induction  $B_\delta$  et le flux  $\Phi$  La différence relative entre la valeur vérifiée et la valeur préliminaire ne doit pas dépasser les 10%

#### a) Charge linéaire

La charge linéaire est le nombre d'ampères par mètre sur la périphérie d'induit.

$$A_1 = \frac{I_{n1} \cdot U_{en1} \cdot Z_1}{\pi \cdot D_{int1} \cdot a_1 \cdot 10^{-3}} \quad (III.26)$$

#### b) Induction magnétique dans l'entrefer

L'induction magnétique dans l'entrefer caractérise l'utilisation magnétique l'annexe 1.

$$B_\delta = \frac{\Phi}{a_i \cdot \tau_{p1} \cdot L_i \cdot 10^{-6}} \quad (III.27)$$

#### c) Flux sous un pôle

$$\Phi = \frac{U_{n1} \cdot K_e}{4 \cdot K_f \cdot f_1 \cdot W_1 \cdot K_{en1}} \quad (III.28)$$

### III.3.5. Dimensionnement du rotor

Le rotor à double cage est beaucoup plus difficile à construire que le rotor à simple cage. On peut pallier à cet inconvénient, tout en gardant la majorité de ses avantages, en construisant une cage rotorique simple avec des barres s'enfonçant profondément dans le circuit magnétique [13-15-23].

#### a) Choix de l'entrefer

Pour des raisons mécanique, on choisit l'entrefer aussi grand que possible pour réduire les pertes supplémentaires dans le fer produites par les pulsations du champs et de la dispersion provoquée par les champs d'harmoniques supérieur. Comme il doit être aussi petit que possible afin d'avoir un facteur de puissance qui s'approche de l'unité, et un courant magnétisant minimal. L'épaisseur de l'entrefer est liée à la puissance de

la machine. Il est donné en fonction de la hauteur d'axe et le nombre de paires de pôles.

**b) Diamètre extérieur du rotor**

Le diamètre extérieur du rotor est donné par l'expression suivante :

$$D_{ext2} = D_{int1} - 2 \cdot \delta \quad (\text{III.29})$$

**c) Courant dans la barre**

En général, le courant dans une phase de l'enroulement rotorique est donné par la relation suivante :

$$I_2 = 1.11 \frac{I_{n1} 6 \cdot K_{en1} W_1 \cos \varphi_n}{Z_2} \quad (\text{III.30})$$

### III.3.6. Dimensionnement de la feuille rotorique

**a) Hauteur de la culasse rotorique**

La hauteur de la culasse rotorique est donnée par la formule suivante :

$$h_{c2} = 0.5 \cdot \frac{\alpha_i \cdot \tau_{p2} \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{c2}} \quad (\text{III.31})$$

Avec :

$$\tau_{p2} = \frac{\pi \cdot D_{ext2}}{2 \cdot p} \quad (\text{III.32})$$

**b) Hauteur de la dent**

La hauteur de la dent est donnée par la formule suivante :

$$h_{z2} = 0,5 \cdot (D_{ext2} - D_{int2}) - h_{c2} \quad (\text{III.33})$$

**c) Pas dentaire rotorique**

Le pas dentaire rotorique est défini comme étant la distance séparant les axes de deux encoches rotorique voisines. Il est donné par la formule suivante :

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_{ext2}}{Z_2} \quad (\text{III.34})$$

**d) Largeur de la dent**

La largeur de la dent est exprimée par l'expression suivante :

$$b_{z2} = \frac{t_2 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{z2max}} \quad (\text{III.35})$$

**e) Diamètre maximal de l'encoche**

Le diamètre supérieur de l'encoche est exprimé par l'expression suivante :

$$d_{21} = \frac{\pi \cdot (D_{ext2} - 2h_{f2}) - Z_2 \cdot b_{z2}}{z_2 - \pi} \quad (\text{III.36})$$

**f) Diamètre minimale de l'encoche**

Le diamètre intérieur de l'encoche est exprimé par l'expression suivante :

$$d_{22} = \frac{\pi \cdot (D_{ext2} - 2h_{z2}) - Z_2 \cdot b_{z2}}{z_2 + \pi} \quad (\text{III.37})$$

**g) La hauteur de l'encoche**

La hauteur de l'encoche est donnée comme suit :

$$h_{enc2} = h_2 + 0,5 \cdot (d_{21} + d_{22}) \quad (\text{III.38})$$

$$h_2 = h_{z2} - h_{f2} - 0,5 \cdot (d_{21} + d_{22}) \quad (\text{III.39})$$

**h) Section de la barre**

Elle est donnée en fonction des dimensions de l'encoche par l'expression suivante :

$$S_b = 0,125 \cdot (d_{21}^2 + d_{22}^2) \cdot \pi + 0,5 \cdot (d_{21} + d_{22}) \cdot h_2 \quad (\text{III.40})$$

**i) Densité du courant**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$j_b = \frac{I_2}{S_b} \quad (\text{III.41})$$

**III.3.7. Dimensionnement de l'anneau****a) Section de l'anneau**

La section de l'anneau est donnée par la formule suivante :

$$S_{an} = (0,35/0,45) \cdot \frac{Z_2 \cdot S_b}{2 \cdot p} \quad (\text{III.42})$$

**b) Hauteur de l'anneau**

La hauteur de l'anneau s'exprime comme suit :

$$h_{an} = (1,1/1,25) \cdot h_{z2} \quad (\text{III.43})$$

**c) Largeur de l'anneau**

La largeur de l'anneau s'exprime comme suit :

$$b_{an} = \frac{S_{an}}{h_{an}} \quad (\text{III.44})$$

**d) Diamètre moyen de l'anneau**

Le diamètre moyen de l'anneau s'exprime comme suit :

$$D_{an} = D_{ext2} - h_{an} \quad (\text{III.45})$$

### III.3.8. Calcul du circuit magnétique

Le circuit magnétique des machines à courant alternatif, et les machines asynchrones en particulier, doit canaliser les lignes de forces du champ magnétique tournant. L'objet de ce calcul consiste à déterminer les forces magnétomotrices (fmm) qui nous permettra de calculer le courant magnétisant et de déduire par la suite la réactance magnétique. Le principe de calcul est basé sur la loi générale de la circulation du champ magnétique. Dans notre cas :

$\oint H \cdot dl$  Représente la somme  $\sum H_x \cdot l_x$  Où :

$H_x$  : Représente le champ magnétique correspondant à l'induction dans le tronçon x.

$l_x$ : représente la ligne moyenne du tronçon choisi.

Le calcul du champ magnétique sera fait pour une paire de pole.

Le circuit magnétique de la machine asynchrone est constitué de cinq parties distinctes :

- Entrefer.
- La culasse statorique.
- La culasse rotorique.
- Les dents statorique.
- Les dents rotorique.

#### III.3.8.1. la culasse statorique

##### a) Induction dans la culasse du stator

$$B_{c1} = \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot B_\delta \cdot \tau_{p1}}{k_{fer} \cdot h_{c1}} \quad (\text{III.46})$$

##### b) Longueur moyenne des lignes de champs dans la culasse statorique

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$L_{c1} = \frac{\pi}{2 \cdot p} (D_{ext1} - h_{c1}) \quad (\text{III.47})$$

##### c) Force magnétomotrice de la culasse statorique

Elle est donnée par la formule suivante :

$$F_{c1} = H_{c1} \cdot L_{c1} \cdot 10^{-3} \quad (\text{III.48})$$

#### III.3.8.2. les dents statorique

##### a) Induction dans la dent du stator

$$B_{z1max} = \frac{t_1 \cdot B_\delta}{k_{fer} \cdot b_{z1}} \quad (\text{III.49})$$

**b) Force magnétomotrice dans la dent du stator**

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_{z1} = H_{z1} \cdot h_{z1} \cdot 10^{-3} \quad (\text{III.50})$$

**III.3.8.3. l'entrefer****a) Force magnétomotrice dans l'entrefer**

La force magnétomotrice dans l'entrefer est proportionnelle à l'induction dans celui-ci :

$$F_{\delta} = 0,8 \cdot B_{\delta} K_{\delta} \cdot \delta \cdot 10^3 \quad (\text{III.51})$$

$$K_{\delta} = K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} \quad (\text{III.52})$$

Avec :

$$K_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{f1}}{t_1 - b_{f1} + (5,8 \cdot \frac{t_2}{b_{f2}})} \quad (\text{III.53})$$

$$K_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{f2}}{t_2 - b_{f2} + (5,8 \cdot \frac{t_2}{b_{f2}})} \quad (\text{III.54})$$

**III.3.8.4. la culasse rotorique****a) Induction dans la culasse rotorique**

$$B_{c2} = \frac{0,5 \cdot \alpha_i \cdot B_{\delta} \cdot \tau_{p2}}{k_{fer} \cdot h_{c2}} \quad (\text{III.55})$$

**b) Longueur moyenne des lignes du champ magnétique dans la culasse du rotor**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$L_{c2} = (D_{ext2} - 2h_{z2} - h_{c2}) \cdot \frac{\pi}{2 \cdot p} + h_{c2} \quad (\text{III.56})$$

**c) Force magnétomotrice dans la culasse du rotor**

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_{c2} = H_{c2} \cdot L_{c2} \cdot 10^{-3} \quad (\text{III.57})$$

Avec :

$$H_{c2} = H_{z2} \cdot (h_{z2} - 0,4 \cdot d_{21}) \quad (\text{III.58})$$

**III.3.8.5. les dents de rotor****a) Induction dans la dent du rotor**

$$B_{z2max} = \frac{t_2 \cdot B_\delta}{k_{fer} \cdot b_{z2}} \quad (III.59)$$

**b) Force magnétomotrice dans la dent du rotor**

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_{z2} = H_{z2} \cdot (h_{z2} - 0.4 \cdot d_{z2}) 10^{-3} \quad (III.60)$$

**III.3.8.6. Force magnétomotrice totale par paire de pôles**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$F = 2 \cdot (F_\delta + F_{z1} + F_{z2}) + F_{c1} + F_{c2} \quad (III.61)$$

Le numéro 2 est du fait que l'entrefer, les dents statorique et rotorique sont parcourus deux fois par les lignes de champ magnétique.

**III.3.8.7. Courant magnétisant**

Il représente la composante réactive du courant à vide, il est donné par la formule suivante :

$$I_\mu = \frac{p \cdot \sum F_i}{0,9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{en1}} \quad (III.62)$$

**III.3.8.9. Réactance de magnétisation**

Elle est exprimée par :

$$X_m = \frac{K_e \cdot U_{n1}}{I_\mu} \quad (III.63)$$

**III.3.8.10. Coefficient de dispersion magnétique du stator**

Il est donné par :

$$\sigma_\mu = \frac{X_1}{X_m} \quad (III.64)$$

**III.3.8.11. Force électromotrice à vide  $E_0$** 

Elle est donnée par :

$$E_0 = \frac{U_{n1}}{1+\sigma_\mu} \quad (\text{III.65})$$

**III.3.9. Calcul des paramètres électriques des enroulements**

Pour pouvoir déterminer les caractéristiques de la machine en procédera au calcul de tous les paramètres suivants :  $(R_1, R_2, X_1, X_2)$

**III.3.9.1. Paramètres statoriques****a) Résistance active d'une phase du stator**

$$R_1 = \rho_{cu}(T) \frac{W_1 \cdot L_{W1} \cdot 10^3}{a_1 \cdot N_{el} \cdot q_{eff}} \quad (\text{III.66})$$

Elle est donnée pour :

$$\begin{aligned} T = 20 \text{ °C} \quad \rho_{cu} &= 17.2 \cdot 10^{-9} \\ L_{W1} &= 2 \cdot (L_i + L_{f1}) \end{aligned} \quad (\text{III.67})$$

Avec :

$$L_{f1} = (1,16 + 0,14 \cdot p) \cdot b_{1moy} + 15 \quad (\text{III.68})$$

$$b_{1moy} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_{z1}) \cdot Y_{1moy}}{Z_1} \quad (\text{III.69})$$

**b) Réactances de fuites et Perméance de fuites du stator**

La réactance de fuite globale du stator comprend

- **Réactance de fuite d'encoche**

Elle est due aux flux de fuite qui se referme autour des conducteurs

$$X_{enc1} = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot l_i \cdot W_1^2}{q_1 \cdot p \cdot 10^8} \cdot \lambda_{enc1} \quad (\text{III.70})$$

- **Réactance de fuite différentielle**

C'est le résultat des flux suivants :

- Flux de fuite de dent à dent à travers l'entrefer.
- Flux différentielle de phase.
- Flux différentielle de l'encoche.

Elle est donnée par :

$$X_{1d} = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot W_1^2}{q_1 \cdot p \cdot 10^8} \cdot \lambda_{1d} \quad (\text{III.71})$$

- **Réactance de fuite frontale**

C'est la réactance présentée par les parties frontales des enroulements situés dans l'air à chaque extrémité du paquet de tôles.

Elle est calculée comme suit

$$\lambda_1 = \lambda_{1f} + \lambda_{1d} + \lambda_{enc1} \quad (\text{III.72})$$

Avec :

$$\lambda_{enc1} = \frac{h_1}{3 \cdot b_{enc12}} \cdot k_{b1} + \left( \frac{h_1}{b_{enc11}} + \frac{3 \cdot h_{k1}}{b_{enc12} + 2 \cdot b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) \cdot k_{b2} \quad (\text{III.73})$$

Avec :

$$\lambda_{1d} = \frac{0,9 \cdot t_1 \cdot (q_1 \cdot K_{en1})^2}{K_\delta \cdot \delta} \cdot K_{rr1} \cdot K_{dd1} \cdot K_{r1} \quad (\text{III.74})$$

$$K_{r1} = 1 - \frac{0,033 \cdot b_{f1}^2}{\delta \cdot t_1} \quad (\text{III.75})$$

Avec :

$$\lambda_{1f} = 0,34 \cdot \frac{q_1 \cdot (L_{f1} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau_{p1})}{L_i} \quad (\text{III.76})$$

- **La réactance totale**

$$X_1 = 1,58 \cdot f_1 \cdot l_i \cdot W_1 \cdot \frac{\lambda_1}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} \quad (\text{III.77})$$

### III.3.9.2. Paramètres rotoriques

#### a) Résistance active de la barre

On a :

$$R_b = \rho_{cu}(T) \cdot \frac{L_i}{S_b} \cdot 10^3 \quad (\text{III.78})$$

Dans le calcul, on assimile la longueur de la barre à celle de l'induit  $L_i = L_2$ .

#### b) Résistance de l'anneau

Elle est donnée par la formule suivant :

$$R_{an} = \frac{\rho_{cu}(T) \cdot 2\pi D_{an} \cdot 10^{+3}}{z_2 \cdot S_{an}} \quad (\text{III.79})$$

#### c) Résistance de l'anneau ramenée à la barre

Elle est donnée par la formule suivant :

$$R_{anramb} = \frac{R_{an}}{(k_{red})^2} \quad (\text{III.80})$$

$$k_{red} = \frac{2 \cdot \pi \cdot p}{z_2} \quad (\text{III.81})$$

#### d) Résistance active d'une phase rotorique

Elle représente la somme des résistances de la barre et celle de l'anneau Ramenée à la barre. Pour notre type d'encoche, elle est donnée comme suit :

$$R_2 = R_b + R_{anramb} \quad (\text{III.82})$$

#### e) Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator

Pour notre type d'encoche elle est donnée comme suit :

$$R_{2ram} = M \cdot R_2 \quad (\text{III.83})$$

#### f) Réactance de dispersion et Perméance du rotor

Dans cette partie, on calcul :

- La réactance de fuite d'encoche, due au flux de fuite qui se renferme autour des conducteurs.

- La réactance frontale, (la partie de l'enroulement située dans l'air à chaque extrémité du paquet de tôles).
- La réactance due au flux différentiel dont la valeur est très élevée dans un entrefer faible.
- Et dans le type d'encoche précédent on distingue aussi :

$$X_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot l_2 \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-9} \quad (\text{III.84})$$

Avec :

$$\lambda_2 = \lambda_{enc2} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{0b} \quad (\text{III.85})$$

#### g) La réactance du rotor ramenée au stator

$$X_{2ram} = M \cdot X_2 \quad (\text{III.86})$$

#### h) La résistance de magnétisation

$$P_{a10} = R_1 \cdot m_1 \cdot I_\mu^2 \quad (\text{III.87})$$

$$I_{0a} = \frac{P_{fer} + P_{mec} + P_{a10}}{m_1 \cdot U_n} \quad (\text{III.88})$$

$$R_m = \frac{X_m \cdot I_\mu}{I_{0a}} \quad (\text{III.89})$$

#### i) le courant total à vide

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2} \quad (\text{III.90})$$

#### j) le courant magnétisant

$$I_{0r} = \frac{p \cdot F}{0,9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K \cdot \epsilon n_1} \quad (\text{III.91})$$

### III.4. Calcul des pertes et du rendement

La transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique s'accompagne inévitablement de perte d'énergie dans les différentes parties du moteur telles que le circuit magnétique, les enroulements statorique et rotorique, ainsi que les différentes parties mécaniques.

Cette partie est consacrée à l'évaluation des pertes dans le moteur asynchrone, et cela pour permettre d'estimer le rendement en sachant qu'il faut l'avoir aussi proche que possible de celui qui figure dans le cahier de charges.

On peut distinguer quatre groupes de pertes :

- Pertes principales dans le fer.
- Pertes électriques dans le cuivre et l'aluminium.

- Pertes mécaniques.
- Pertes supplémentaires.

### III.4.1. Pertes principales dans le fer

Les pertes principales dans le fer sont les pertes par hystérésis, dues au déphasage entre le courant magnétisant et le flux fondamental, et les pertes par courant de Foucault dues à la circulation des courants induits par le flux fondamental dans les tôles magnétiques. Les dents et la culasse statorique sont les parties les plus touchées par ces pertes. Les pertes magnétiques dans le rotor sont négligeables à cause de la faible fréquence de flux.

$$p_{fer} = p_{fc1} + p_{fz1} \quad (\text{III.92})$$

### III.4.2. Pertes électriques dans le cuivre

Ce sont les pertes par effet joules dans les enroulements statorique et rotorique. Elles sont proportionnelles au carré des courants qui circulent dans ces enroulements :

#### a) Pertes joules statorique

Les pertes joules statorique sont les pertes électriques dans le cuivre, elles sont données par la formule suivante :

$$p_{j1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_{n1}^2 \quad (\text{III.93})$$

#### b) Pertes joules rotorique

Ce sont les pertes dans cuivre, elles sont données par la formule suivante :

$$p_{j2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad (\text{III.94})$$

#### c) Pertes mécaniques.

$$p_{mec} = k_t \cdot (n_s \cdot 10^{-3})^2 \cdot (D_{ext1} \cdot 10^{-2})^4 \quad (\text{III.95})$$

Avec :  $k_t = 1$  car  $2p > 2$

#### d) Pertes supplémentaires.

$$p_{sup} = 0.005 \cdot \frac{p_n \cdot 10^3}{\eta_n} \quad (\text{III.96})$$

#### e) Pertes totales

$$p_t = p_{fer} + p_{j1} + p_{j2} + p_{mec} + p_{sup} \quad (\text{III.97})$$

### III.4.3. Le rendement de la machine

Le rendement de la machine est donné par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_n \cdot 10^3}{P_n \cdot 10^3 + P_{tot}} \quad (\text{III.98})$$

### III.5. Application numérique

#### III.5.1. Présentation de la machine

La machine étudiée est une machine asynchrone à double cage, de puissance de 250 kW, en cours de fabrication à l'entreprise Electro-Industries de d'Azazga. Le cahier de charge de la machine est donné par le tableau III.1 :

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
Puissance nominale	$P_n$	250	kW
Nombre de phase	$m_1$	3	-
La fréquence	$f_1$	50	Hz
Tension nominale	$U_n$	400	V
Vitesse de synchronisme	$n_s$	1500	tr/min
Vitesse nominale	$n_n$	1487	tr/min

Tableau III. 1 : Cahier de charge de la machine étudiée

La Figure III. 1 montrent quelques photos du moteur calculé avant et pendant son bobinage :



Figure III. 1: Moteur asynchrone à double cage d'écureuil 250 kW

## III.5.2. Résultats

## III.5.2.1. Paramètres principaux du stator

Paramètre	Symbole	Valeur
Facteur de majoration	$K_e$	0.975
Puissance électromagnétique en [kW]	$P_e$	298.056
Diamètre extérieur du stator en [mm]	$D_{ext1}$	460
Diamètre intérieur du stator en [mm]	$D_{int1}$	310
Facteur de distribution	$k_{d1}$	0.957
Coefficient de raccourcissement	$K_{r1}$	0.965
Facteur de bobinage de l'enroulement statorique	$K_{en1}$	0.925
Coefficient de remplissage des paquets de tôles	$k_{fer}$	0.97
Longueur virtuelle de l'induit en [mm]	$l_i$	611.5
Coefficient de recouvrement polaire	$\alpha_i$	0.64
Facteur de forme de la courbe d'induction	$k_f$	1.11
Rapport de raccourcissement	$\beta$	0.833
Angle électrique en [degrés]	$\gamma$	15
Le pas polaire en nombre d'encoche statorique	$\tau$	12

Tableau III. 2: Paramètres principaux de stator

## III.5.2.2. Paramètres de l'enroulement statorique

Paramètre	Symbole	Valeur
Le pas polaire statorique en [mm]	$\tau_{p1}$	243.5
Le pas dentaire statorique en [mm]	$t_1$	20.3
Pas d'enroulement	$y_1$	10
Nombre de conducteurs effectifs dans une encoche	$U_{en1}$	12
Courant nominal en [A]	$I_{n1}$	254.748
Nombre de spire d'une voie parallèle	$W_1$	24
Section effective du conducteur en [mm <sup>2</sup> ]	$S_{eff1}$	16.542
Nombre de conducteurs élémentaires	$N_{elt}$	12
Nombre de conducteurs élémentaires 1	$N_{elt1}$	6
Nombre de conducteurs élémentaires 2	$N_{elt2}$	6

Tableau III. 3: Paramètres de l'enroulement statorique

## III.5.2.3. Paramètres de la feuille statorique

Paramètre	Symbole	Valeur
Largeur de la dent statorique en [mm]	$b_{z1}$	9.58
La hauteur du dos du stator en [mm]	$h_{c1}$	38.87
Hauteur de la dent statorique en [mm]	$h_{z1}$	36.13
Largeur minimale de l'encoche st en [mm]	$b_{enc11}$	11.18
Largeur maximale de l'encoche st en [mm]	$b_{enc12}$	15.43
La hauteur de la clavette en [mm]	$h_{k1}$	0
Hauteur de fente d'encoche statorique en [mm]	$h_{f1}$	1.6
La hauteur entre les axes de l'encoche en [mm]	$h_1$	36.13
Section de l'encoche statorique en [ $mm^2$ ]	$S_{en1}$	514.98
Section occupée par l'isolation en [ $mm^2$ ]	$S_{iso}$	59.22
Coefficient de remplissage	$K_{re1}$	0.543

Tableau III. 4: paramètres de la feuille statorique

## III.5.2.4. Vérification des paramètres électromagnétiques

Paramètre	Symbole	Valeur
Charge linéaire en [ $A/m$ ]	$A_1$	36411.5
Induction dans l'entrefer en [ $T$ ]	$B_\delta$	0.83
Flux sous un pôle en [ $Web$ ]	$\Phi$	0.0791

Tableau III. 5: Vérification des paramètres électromagnétiques

## III.5.2.5. Paramètres du circuit magnétique statorique

Paramètre	Symbole	Valeur
Induction magnétique dans le dos du stator en [ $T$ ]	$B_{c1}$	1.777
Longueur moy des lignes de champs dans le stator en [ $mm$ ]	$L_{c1}$	330.755
Force magnétomotrice de la culasse statorique en [ $A \cdot tours$ ]	$F_{c1}$	48.952
Induction maximale dans la dent statorique en [ $T$ ]	$B_{z1max}$	1.877
Force magnétomotrice dans la dent du stator en [ $A \cdot tours$ ]	$F_{z1}$	18.968

Tableau III. 6: Paramètres du circuit magnétique statorique

## III.5.2.6. Les Paramètres électriques du stator

Paramètre	Symbole	Valeur
Résistance d'une phase statorique en [ <i>Ohm</i> ]	$R_1$	0.0117
Réactance de fuite d'encoche en [ <i>Ohm</i> ]	$X_{enc1}$	0.03617
Réactance de fuite frontale en [ <i>Ohm</i> ]	$X_{1f}$	0.0025
Réactance de fuite différentielle en [ <i>Ohm</i> ]	$X_{1d}$	0.27
Perméance de dispersion de l'enroulement statorique	$\lambda_1$	9.092
Coefficient de perméance différentielle statorique	$\lambda_{1d}$	7.98
Coefficient de perméance d'encoche statorique	$\lambda_{enc1}$	1.04
La réactance totale en [ <i>Ohm</i> ]	$X_1$	0.013

Tableau III. 7: Paramètres électriques du stator

## III.5.2.7. Paramètres principaux du rotor

Paramètre	Symbole	Valeur
Le nombre d'encoches rotorique	$Z_2$	40
Longueur virtuelle de paquet rotorique en [ <i>mm</i> ]	$l_2$	611.5
Diamètre extérieur du rotor en [ <i>mm</i> ]	$D_{ext2}$	307.8
Diamètre intérieur du rotor en [ <i>mm</i> ]	$D_{int2}$	110
Courant dans la barre rotorique en [ <i>A</i> ]	$I_2$	738.03

Tableau III. 8: Paramètres principaux du rotor

## III.5.2.8. Paramètres de la feuille rotorique

Paramètre	Symbole	Valeur
Hauteur de la culasse rotorique en [ <i>mm</i> ]	$h_{c2}$	53.58
Pas polaire rotorique en [ <i>mm</i> ]	$\tau_{p2}$	241.746
Hauteur de la dent rotorique en [ <i>mm</i> ]	$h_{z2}$	45.05
Pas dentaire rotorique en [ <i>mm</i> ]	$t_2$	24.175
Largeur de la dent rotorique en [ <i>mm</i> ]	$b_{z2}$	17.04
Diamètre maxi de l'encoche rotorique en [ <i>mm</i> ]	$d_{21}$	7.65
Diamètre min de l'encoche rotorique en [ <i>mm</i> ]	$d_{22}$	0.25
La hauteur de l'encoche rotorique en [ <i>mm</i> ]	$h_{enc2}$	44.55
La hauteur entre les axes de l'encoche en [ <i>mm</i> ]	$h_2$	40.79
Section de la barre en [ <i>mm</i> <sup>2</sup> ]	$S_b$	179.7
Densité du courant rotorique en [ <i>A/m</i> <sup>2</sup> ]	$j_b$	2.37

Tableau III. 9: Paramètres de la feuille rotorique

## III.5.2.9. Paramètres de l'anneau

Paramètre	Symbole	Valeur
Section de l'anneau en $[mm^2]$	$S_{an}$	1397.66
Hauteur de l'anneau en $[mm]$	$h_{an}$	39.64
Largeur de l'anneau en $[mm]$	$b_{an}$	35.25
Diamètre moyen de l'anneau en $[mm]$	$D_{an}$	268.16

Tableau III. 10: Paramètres de l'anneau

## III.5.2.10. Paramètres du circuit magnétique rotorique

Paramètre	Symbole	Valeur
Induction dans la culasse rotorique en $[T]$	$B_{c2}$	1.28
Longueur moy des lignes du champ dans le rotor en $[mm]$	$L_{c2}$	182.47
Force magnétomotrice dans la culasse du rotor en $[A. tours]$	$F_{c2}$	7.04
Force magnétomotrice dans la dent du rotor en $[A. tours]$	$F_{z2}$	31.52
Induction admissible dans la dent rotorique en $[T]$	$B_{z2}$	1.25

Tableau III. 11: Paramètres du circuit magnétique rotorique

## III.5.2.11. Les paramètres électriques du rotor

Paramètre	Symbole	Valeur
Résistance de l'anneau en $[Ohm]$	$R_{an}$	$5.12 \cdot 10^{-7}$
Résistance active de la barre en $[Ohm]$	$R_b$	$5.7 \cdot 10^{-5}$
Résistance de l'anneau ramenée à la barre en $[Ohm]$	$R_{anramb}$	$1.63 \cdot 10^{-6}$
Résistance d'une phase rotorique en $[Ohm]$	$R_2$	$5.8 \cdot 10^{-5}$
Résistance rotorique ramenée au stator en $[Ohm]$	$R_{2ram}$	$8.6 \cdot 10^{-3}$
Coefficient de Perméance d'encoche rotorique	$\lambda_{enc2}$	0.78
Coefficient de Perméance différentielle rotorique	$\lambda_{2d}$	1.7
Perméance de dispersion de l'enroulement rotorique	$\lambda_2$	4.396
Résistance active d'une phase rotorique en $[Ohm]$	$X_2$	$1.06 \cdot 10^{-3}$
La réactance du rotor ramenée au stator en $[Ohm]$	$X_{2ram}$	0.158

Tableau III. 12: Paramètres électrique du rotor

## III.5.2.12. Les Paramètres globaux du circuit magnétique

Paramètre	Symbole	Valeur
Champ dans la culasse statorique en $[A/m]$	$H_{z1}$	525
Champ dans la culasse rotorique en $[A/m]$	$H_{z2}$	700
Largeur de la fente de l'encoche statorique	$b_{f1}$	3.4
Largeur de la fente de l'encoche rotorique	$b_{f2}$	2.0
Champ dans la culasse statorique en $[A/m]$	$H_{c1}$	148
Champ dans la culasse rotorique en $[A/m]$	$H_{c2}$	85
Force magnétomotrice totale [ <i>A. tours</i> ]	$F$	1761
Courant magnétisant en $[A]$	$I_{\mu}$	58.77
Réactance de magnétisation	$X_m$	6.63
Courant à vide active en $[A]$	$I_{0a}$	6.25
Le courant magnétisant à vide en $[A]$	$I_{0r}$	58.75
Le courant total à vide en $[A]$	$I_0$	59.08
Coefficient de dispersion magnétique du stator	$\sigma_{\mu}$	0.0019
Force électromotrice à vide en $[V]$	$E_0$	399.22
La résistance de magnétisation en $[Ohm]$	$R_m$	62.34

Tableau III. 13: Paramètres globaux du circuit magnétique

## III.5.2.13. Paramètres de l'entrefer

Paramètre	Symbole	Valeur
Force magnétomotrice dans l'entrefer [ <i>A. tours</i> ]	$F_{\delta}$	802.208
Coefficient de CARTER	$K_{\delta}$	1.06

Tableau III. 14: Paramètres de l'entrefer

## III.5.2.14. Pertes et de Rendement

Paramètre	Symbole	Valeur
Pertes dans la culasse statorique en [w]	$p_{fc1}$	$4.853.10^3$
Pertes dans les dents en [w]	$p_{fz1}$	$1.533.10^3$
Pertes fer en en [w]	$p_{fer}$	$6.38.10^3$
Pertes joules statorique en [w]	$p_{j1}$	$1.85.10^3$
Pertes joules rotorique en [w]	$p_{j2}$	$1.042.10^3$
Pertes mécanique en [w]	$p_{mec}$	$1.007.10^3$
Pertes supplémentaires en [w]	$p_{sup}$	$1.33.10^3$
Pertes totales en [w]	$p_t$	$11.6.10^3$
Puissance à vide en [w]	$P_{a10}$	121.23
Le rendement de la machine	$\eta$	0.955

Tableau III. 15: Pertes et le rendement

## III.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons explicité la méthodologie de dimensionnement adoptée en mettant en avant toutes les expressions analytiques nécessaire. Le processus de calcul est séquentiel. Les grandeurs géométriques sont calculées et vérifiées. Ensuite on calcul les dimensions des dents et de la culasse avec leurs inductions respectives. A partir du calcul du nombre de conducteurs par encoche on finalise les dimensions de l'encoche du stator, Le même processus est adopté pour le rotor.

*Chapitre IV*

*Analyse numérique*  
*des performances d'un*  
*MAS de 250 kW*

### IV.1. Introduction

Dans tous les domaines de la science, les ingénieurs sont amenés à concevoir de nouveaux dispositifs. Cette conception, au début manuelle est basée sur l'expérience et la pratique et elle devient de plus en plus automatisée grâce à l'arrivée des ordinateurs. En effet, l'introduction de modèles analytiques basés sur les mathématiques est une première phase pour le dimensionnement, ensuite l'utilisation des modèles numériques autorise les concepteurs à dimensionner par modifications successives les dispositifs et permet de réaliser des modèles de plus en plus performants [2].

Dans ce dernier chapitre, nous allons faire une étude par CAO du moteur asynchrone étudié dans le chapitre précédent. La démarche consiste à utiliser une approche numérique utilisant la méthode des éléments finis. L'étude est alors réalisée en utilisant le logiciel Ansys-Maxwell pour la simulation des performances électromagnétiques et dynamiques du moteur.

### IV.2. Principe de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis permet de résoudre des problèmes d'équations aux dérivées partielles. Le principe fondamental de cette méthode éléments finis réside dans le passage du milieu continu à sa représentation discrétisée. Cela revient à découper la représentation du domaine en un ensemble de sous-domaines élémentaires appelés les éléments finis [24].

Dans chaque élément la fonction physique inconnue qui modélise le phénomène, est approché par une interpolation polynomiale. Cette interprétation peut être linéaire ou d'un degré plus élevé selon l'application.

Les éléments finis sont des points, des segments, des triangles, des quadrilatères,...etc. Ils réalisent une répartition du domaine d'étude, ils sont disjoints et leurs unions recouvrent le domaine tout entier, cette répartition est aussi appelée découpage, discrétisation ou maillage.

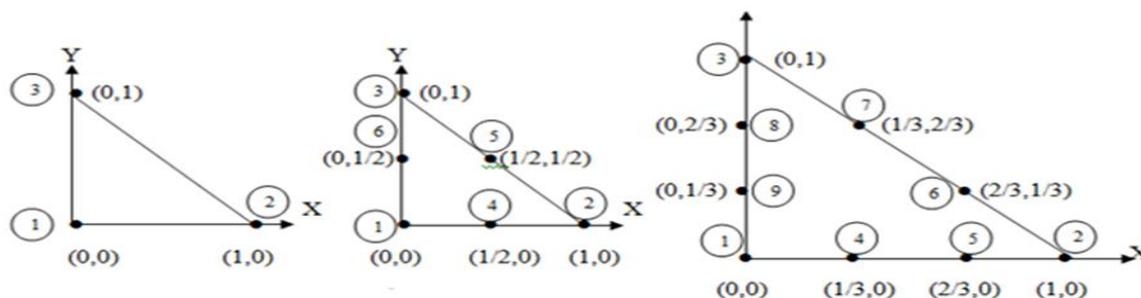
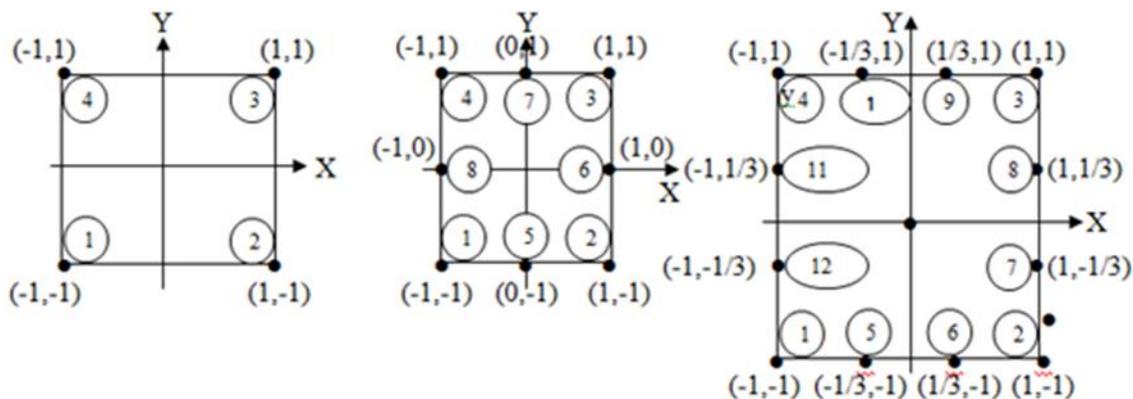


Figure IV. 1: Eléments 2D triangulaires



Linéaire (4 nœuds)

Quadratique (8 nœuds)

Cubique (12 nœuds)

Figure IV. 2: Éléments 2D carrés

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

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

### IV.3. La CAO des machines électriques

Le chercheur qui veut réaliser une modélisation doit avant toute chose, déterminer le modèle le plus adapté à l'étude qu'il veut entreprendre. Ainsi les équations de Maxwell décrivent globalement tous les phénomènes électromagnétiques, il s'y ajoute les phénomènes thermiques décrits par l'équation de diffusion de la chaleur, les phénomènes mécaniques,...etc. Suivant les dispositifs qu'il étudie, certains phénomènes peuvent devenir négligeables et l'ensemble des équations du modèle peut se réduire à celui d'un modèle plus simple. Parmi les méthodes numériques classiques, on peut citer : différences finies, éléments finis, intégrales de frontières et les méthodes mixtes. C'est la méthode des éléments finis qui s'adapte le mieux aux géométries élaborées et aux phénomènes physiques complexes [1].

La résolution d'un problème par la méthode des éléments finis intervient dans le cadre de la modélisation des machines électriques. Pour que l'ensemble du processus de modélisation soit efficace, il faut intégrer la résolution par la méthode des éléments finis dans un ensemble de traitement qui comprend la préparation des données, la résolution et une

exploitation facile et commode des résultats. L'assemblage de ces programmes d'application constitue un environnement intégré de CAO.

Au niveau d'un logiciel CAO, on peut représenter ces trois étapes bien distinctes par la terminologie couramment utilisée :

- Préprocesseur.
- Processeur de résolution.
- Post-processeur ou processeur d'exploitation.

### **IV.3.1. Le Préprocesseur**

Ce module a pour rôle l'acquisition complète de l'objet à modéliser avec toutes ses caractéristiques géométriques et physiques et sa décomposition en éléments finis. Il doit réaliser les fonctions suivantes :

- Description de la géométrie.
- Maillage.
- Description des caractéristiques physiques.

La description de la géométrie est assurée par un module que l'on appelle généralement modeleur géométrique. Suivant le type de modeleur un objet est :

Construit par des opérations booléennes (union, intersection, transformations géométriques,...) sur des objets de base (polygone, cercle, ellipse, cylindre...). Cette méthode s'appelle modèle solide ou géométrie constructive.

Définit à partir de ses frontières géométriques (points, lignes, surfaces et volumes), cette méthode est nommée modèle filaire ou description de frontières.

Le maillage consiste à déterminer l'ensemble des nœuds et des éléments qui composent le domaine d'étude. Cette discrétisation doit bien entendu respecter les limites du domaine et des objets, il existe de nombreuses techniques de discrétisation comme le maillage par blocs par exemple ou on fait un premier découpage en blocs de topologie simple par des triangles et des quadrilatères en 2D et ensuite chaque bloc est subdivisé en éléments finis.

La description des caractéristiques physiques sert à:

- définir le type du problème (magnétostatique, magnétodynamiques, magnétothermique,...)
- à associer un matériau à chaque région qui compose le domaine.

- Décrire les caractéristiques physiques des matériaux, en électricité, ce sont en général des caractéristiques électromagnétiques telles que: perméabilité magnétique, conductivité électrique, densité de courant,...etc.
- Décrire les sources.
- Décrire les conditions aux limites (conditions de Dirichlet, conditions cycliques, conditions de Neumann,...) [2].

### IV.3.2. Le Processeur

C'est le module chargé de mettre en œuvre des éléments finis, c'est-à-dire, la résolution du système d'équations linéaires ou non linéaires. Ce module reçoit en entrée la discrétisation du domaine, les caractéristiques physiques et les conditions aux limites. Il produit en sortie les valeurs des inconnues en chaque nœud du maillage.

### IV.3.3. Le Post-processeur

La résolution achevée, on dispose aux nœuds du maillage de la variable d'état, celle-ci n'est pas directement exploitable du fait :

- du nombre important de valeurs numériques (plusieurs milliers);
- que la variable d'état n'a pas toujours une signification physique simple.

Le post-processeur permet de visualiser des grandeurs locales scalaires ou vectorielles sur des plans de coupes, le long d'une ligne, il permet aussi de calculer des grandeurs globales comme les forces et les couples qui s'exercent sur une région ou sur tout le domaine.

## IV.4. Equations de Maxwell

L'ensemble des phénomènes électromagnétiques est régi par les équations de Maxwell [24-25]. Celles-ci constituent un système d'équations aux dérivées partielles qui lient les phénomènes magnétiques aux phénomènes électriques. Ces équations sont les suivantes :

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

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

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

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

$\vec{E}$  [V/m] et  $\vec{H}$  [A/m] : Champ électrique et magnétique.

$\vec{D}$  [C/m<sup>2</sup>] et  $\vec{B}$  [T] : Induction électrique et magnétique.

$\vec{J}$  [A/m<sup>2</sup>] et  $\rho$  [C/m<sup>3</sup>] : Densité de courants de conduction et de charge électrique.

L'équation (4) est une généralisation de la loi d'Ampère, i.e.  $\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}$ . Elle constitue avec (IV.2) les équations dites de couplage électromagnétique, alors que les équations (IV.1) et (IV.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 (IV-4) serait indéterminé. Elles sont données généralement sous les formes suivantes :

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

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

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

$\mu$  : Perméabilité magnétique [H/m].

$\varepsilon$  : Permittivité électrique [F/m].

$\sigma$  : Conductivité électrique [ $(\Omega \cdot m)^{-1}$ ].

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 :

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

Ce qui induit l'équation la conservation de la densité de courant suivante :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0 \quad (\text{IV.9})$$

#### IV.5. Formulation $\vec{A} - V$

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 [26].

En reprenant l'équation (IV.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 :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Cette jauge est introduite par pénalité en ajoutant le terme :

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

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

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

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

#### IV.6. Présentation du logiciel Ansys-Maxwell

Leader dans le marché, Ansys-Maxwell, est un logiciel de simulation par éléments finis de champs électromagnétiques. Il est utilisé pour la conception et l'analyse des moteurs électriques, actionneurs, capteurs, transformateurs et autres dispositifs électromagnétiques et électromécaniques [20].

Maxwell Permet de caractériser le mouvement transitoire non linéaire des composants électromécaniques et leurs effets sur la conception du circuit d'entraînement et du système de commande. Grâce aux solveurs de champs électromagnétiques d'Ansys-Maxwell, nous pouvons comprendre la performance des systèmes électromécaniques avant fabrication. Ce laboratoire virtuel donne un important avantage concurrentiel. Commercialisation plus rapide, réduction des coûts et amélioration de la performance du système. L'organigramme adopté par le logiciel est donné comme suit :

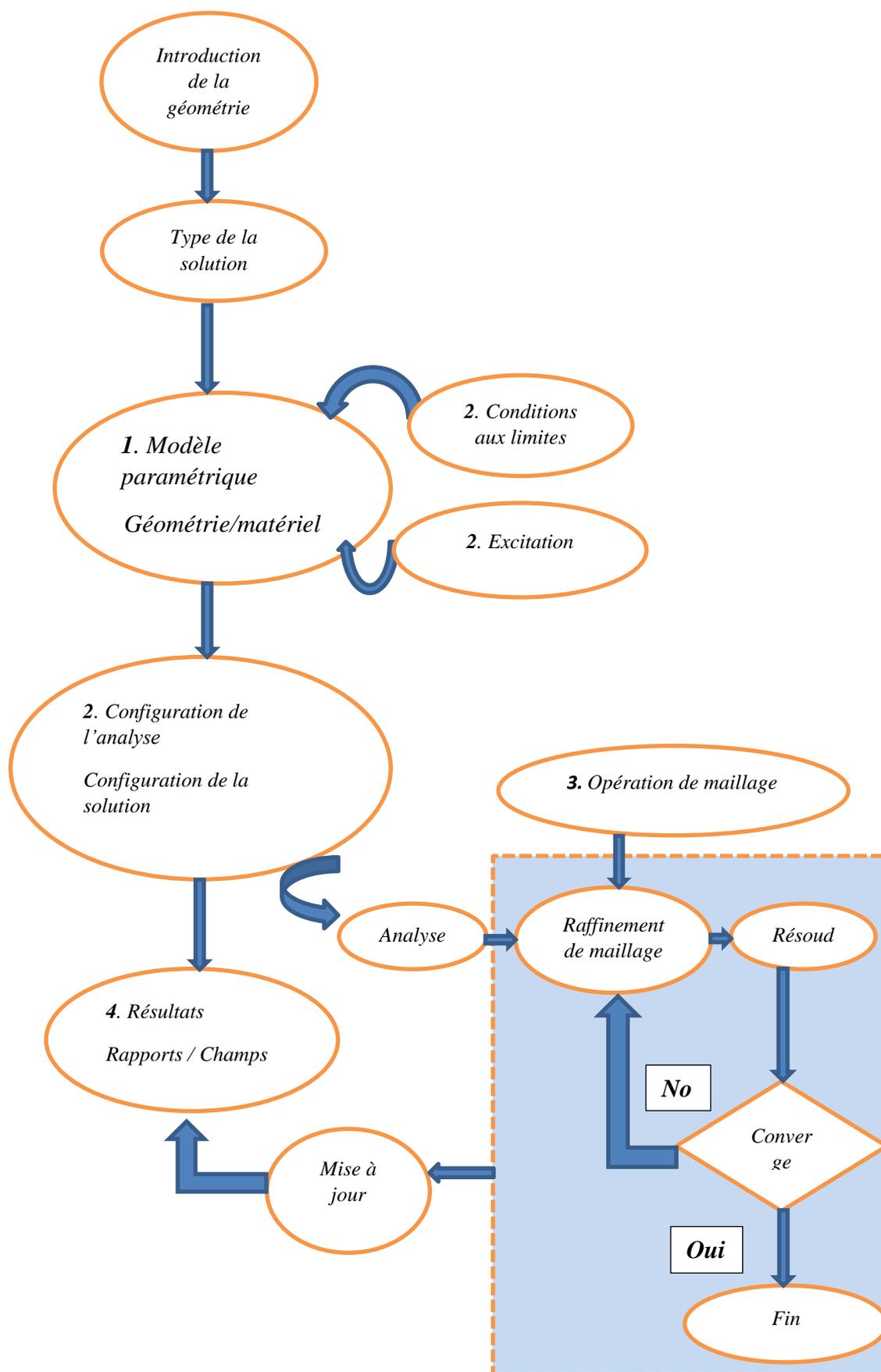


Figure IV. 3: Organigramme de simulation

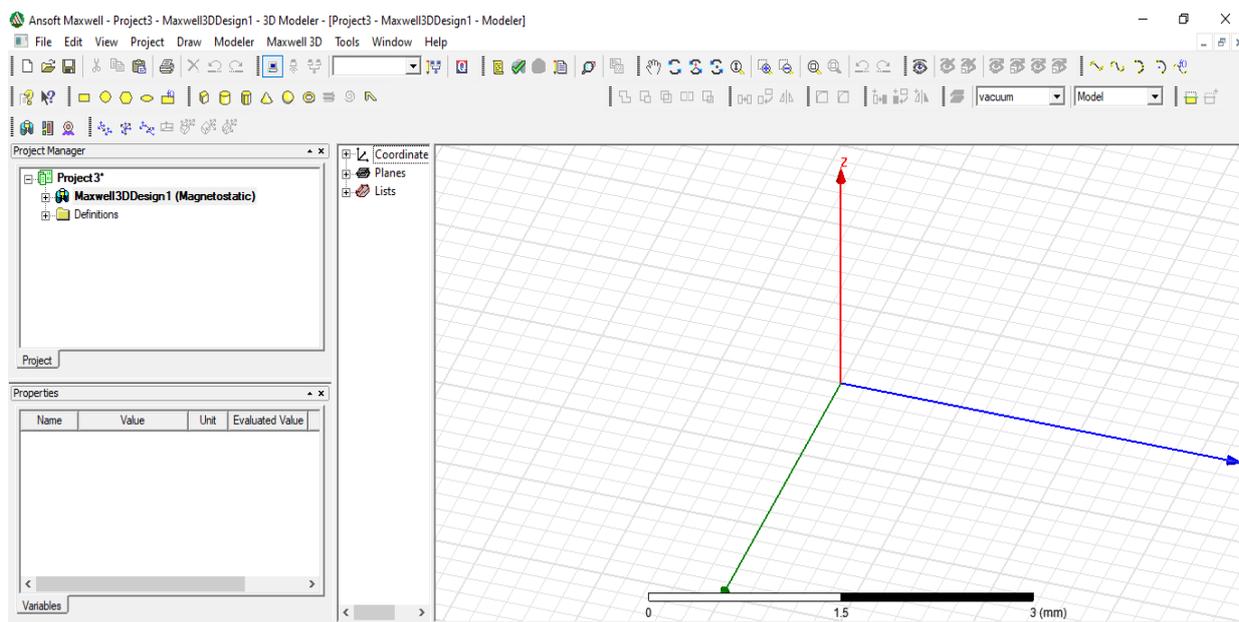


Figure IV. 4: Interface de logiciel Ansys-Maxwell

#### IV.7. Simulation de la machine

La figure (IV.5) représente la géométrie de notre moteur sous l'environnement Ansys Maxwell. Après avoir introduit les dimensions géométrique, les matériaux et construit le bobinage, nous passerons à la simulation du moteur pour différents régimes de marche.

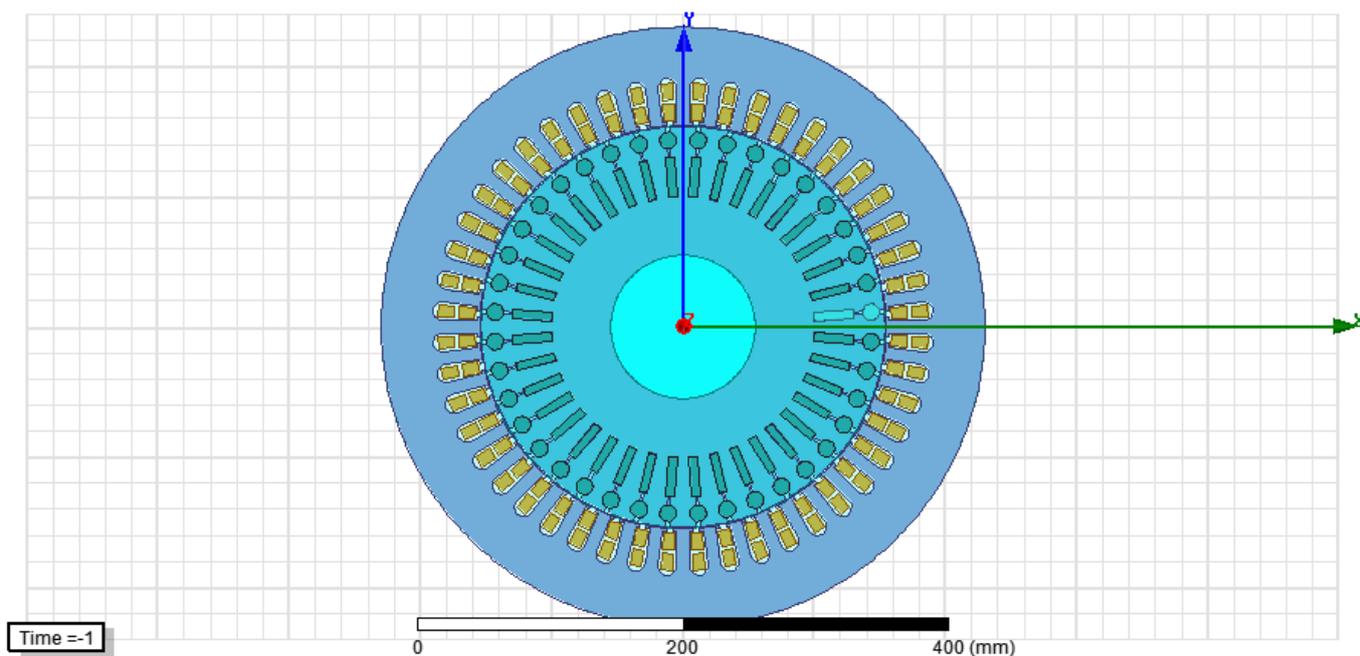


Figure IV. 5: Coupe transversale de la machine sous l'environnement Ansys-Maxwell

La figure (IV.6) représente le maillage du moteur, ce dernier est plus fin au niveau de l'entrefer et au niveau des barres rotoriques pour un meilleur calcul des grandeurs électromagnétiques.

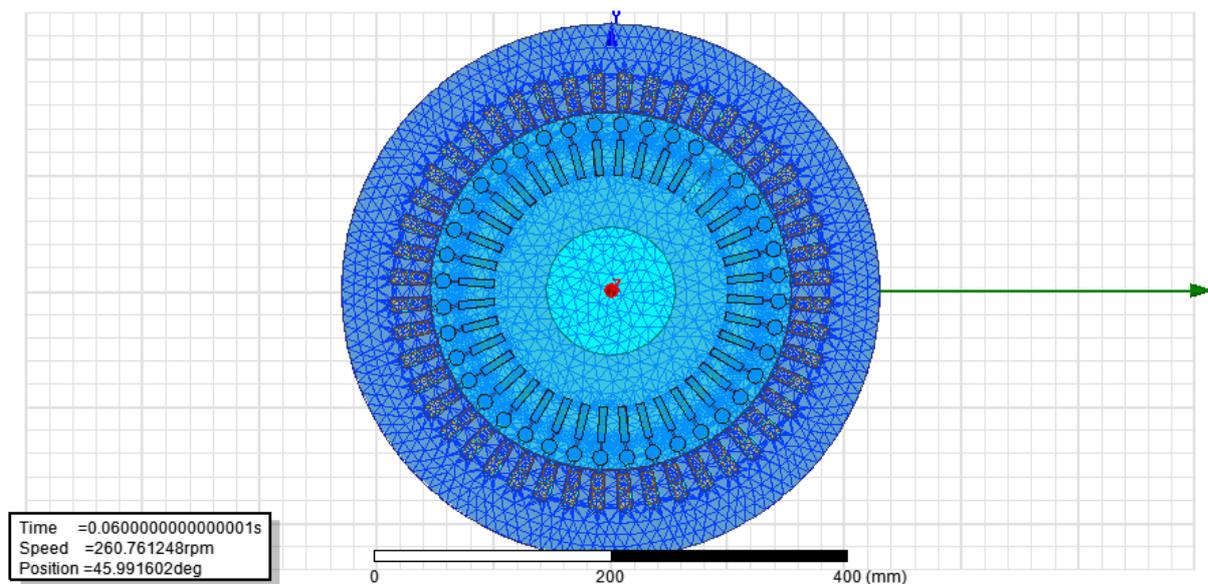


Figure IV. 6: Maillage de moteur

Les paramètres trouvés ont été appliqués pour concevoir notre bobinage sur le logiciel. La figure (IV. 7) représente la distribution obtenue :

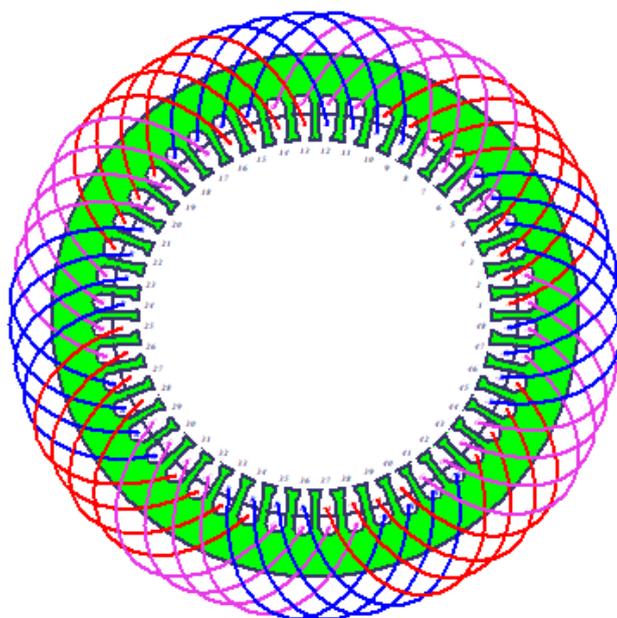


Figure IV. 7: Distribution de bobinage

### IV.8. La Courbe de première aimantation

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 et constitue une information essentielle lors de la conception de circuit magnétique des machines électriques. La tôle utilisée pour la fabrication du circuit magnétique de notre moteur est de type Fer-Si.

Sa courbe de première aimantation est donnée par la figure ci-dessous :

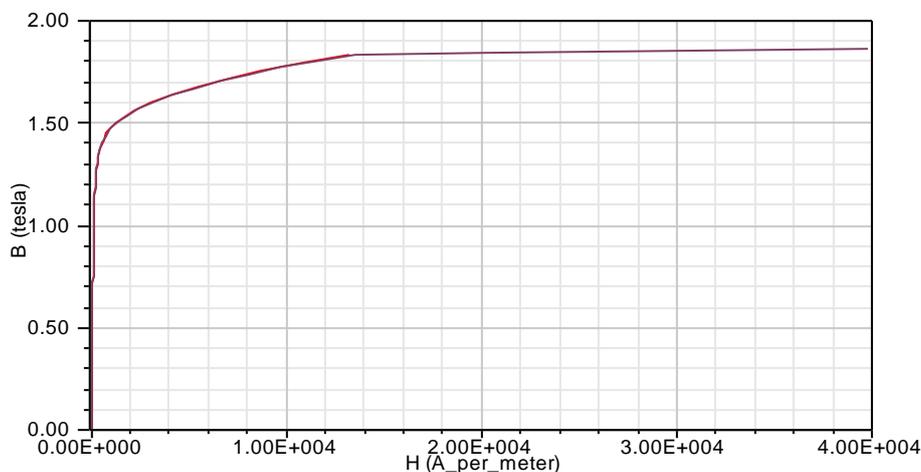


Figure IV. 8: Courbe de première aimantation de la tôle magnétique utilisée à Electro-Industries

### IV.9. Essai à vide

Lors de cet essai, nous visualisons la variation des paramètres de la machine asynchrone telle que le courant, la vitesse et le couple en fonction de temps (régime transitoire et permanent). La machine asynchrone n'entraînant pas de charge mécanique ( $C_{ch} = 0 \text{ N.m}$ ), la puissance utile est donc nul, il existe cependant un couple résistant de très faible valeur équivalent aux pertes par frottement et ventilation de ce fait donc le glissement est presque nul ( $g \approx 0$ ). Nous avons simulé le comportement de notre moteur à vide, ce dernier est alimenté en triangle avec une tension de 400 Volt entre phases Les résultats obtenus sont donné par les graphes suivants :

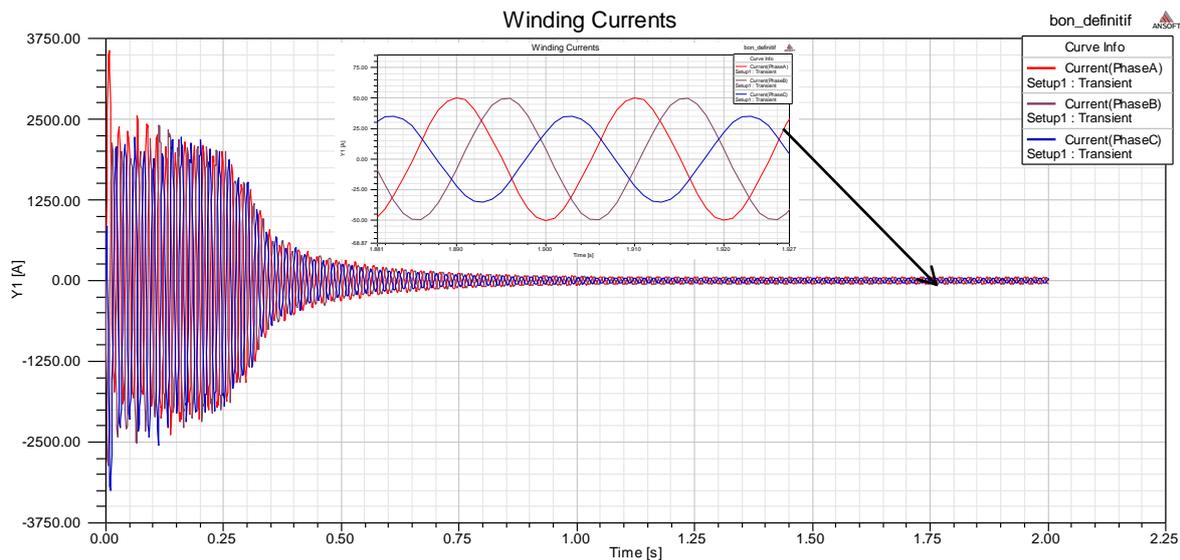


Figure IV. 9: Courants statoriques à vide

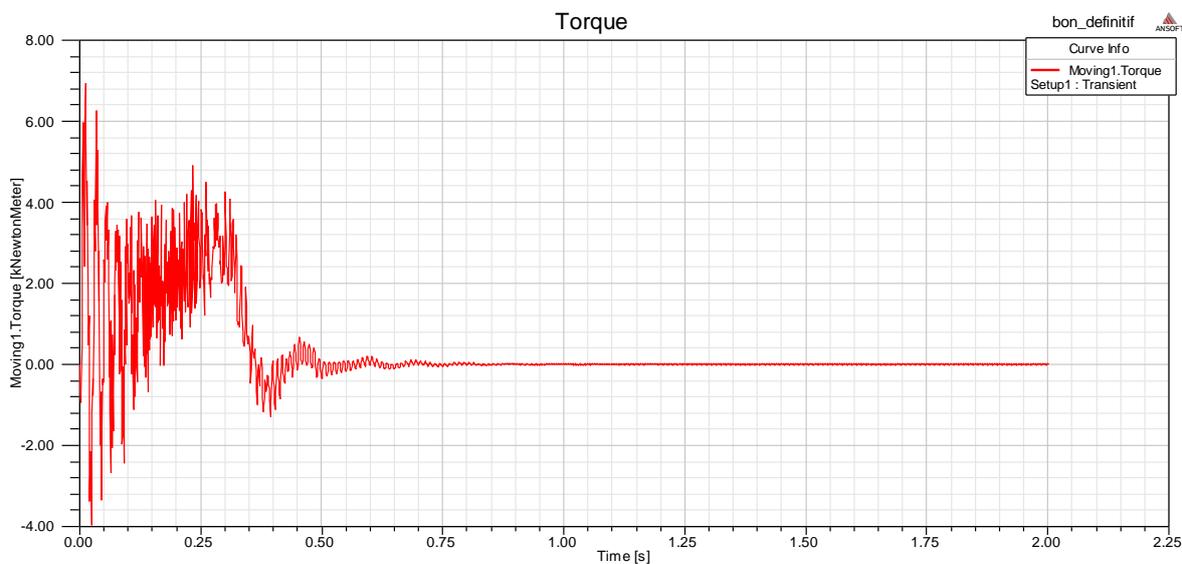


Figure IV. 10: Couple du moteur à vide

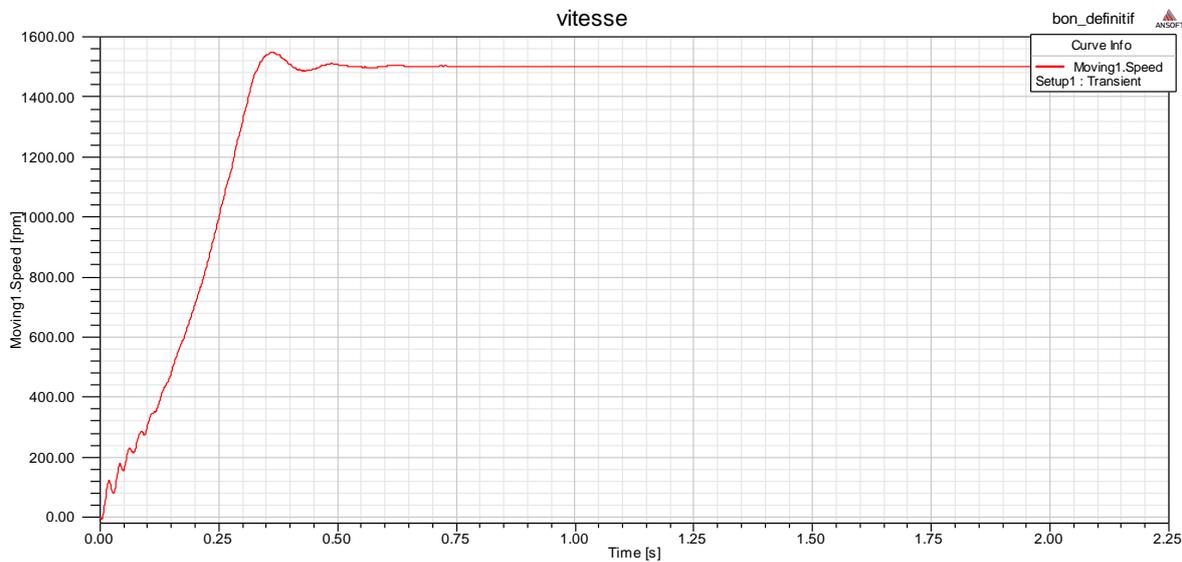


Figure IV. 11: Vitesse du moteur à vide

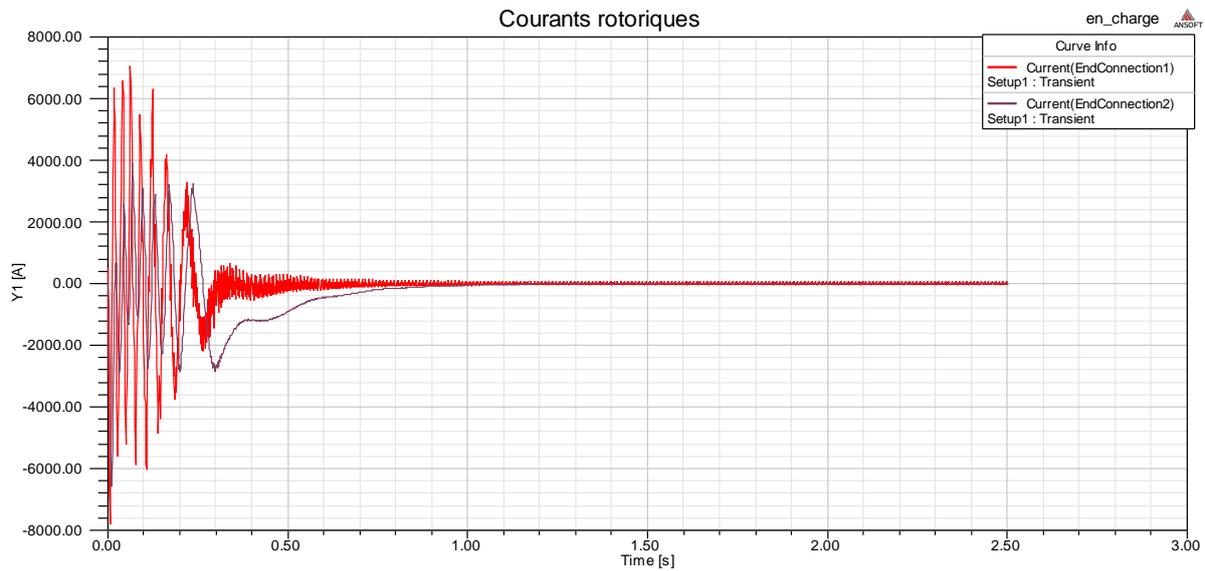


Figure IV. 12: Courants rotoriques à vide

Au démarrage, le moteur fait appel à un grand courant pour développer le couple nécessaire afin de vaincre l’inertie du rotor. En régime permanent, le couple développé est nul car le moteur n’entraîne aucune charge.

IV.10. Essai en charge

Le moteur est maintenant chargé. C’est-à-dire que ce dernier entraîne une charge résistante qui s’oppose au mouvement de rotor. On applique la charge à partir d’un instant donné et on observe la réponse développée par le moteur.

Nous avons représenté les courbes : courant, couple et vitesse et ce pour des valeurs du couple de charge de 1605.79 N.m, 1200 N.m et 800 N.m.

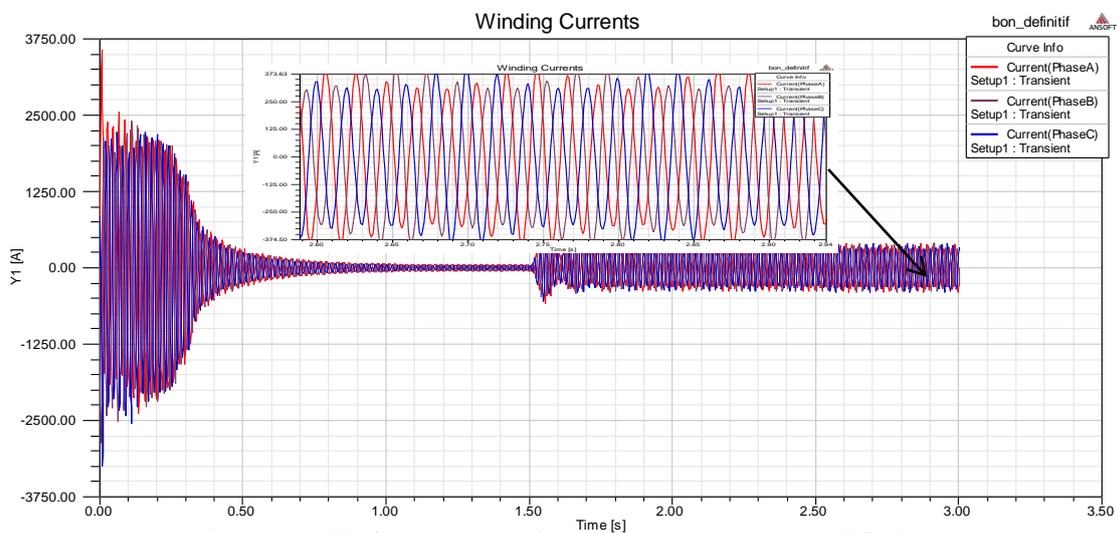


Figure IV. 13: Courant statorique pour une charge de 1605.79 N.m

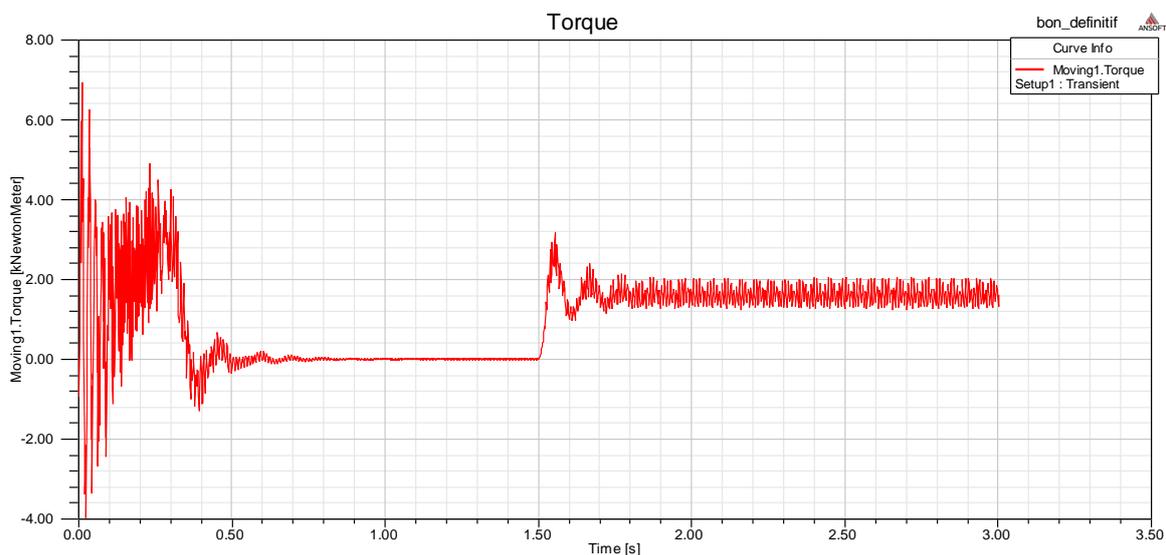


Figure IV. 14: Couple de moteur pour une charge 1605.79 N.m

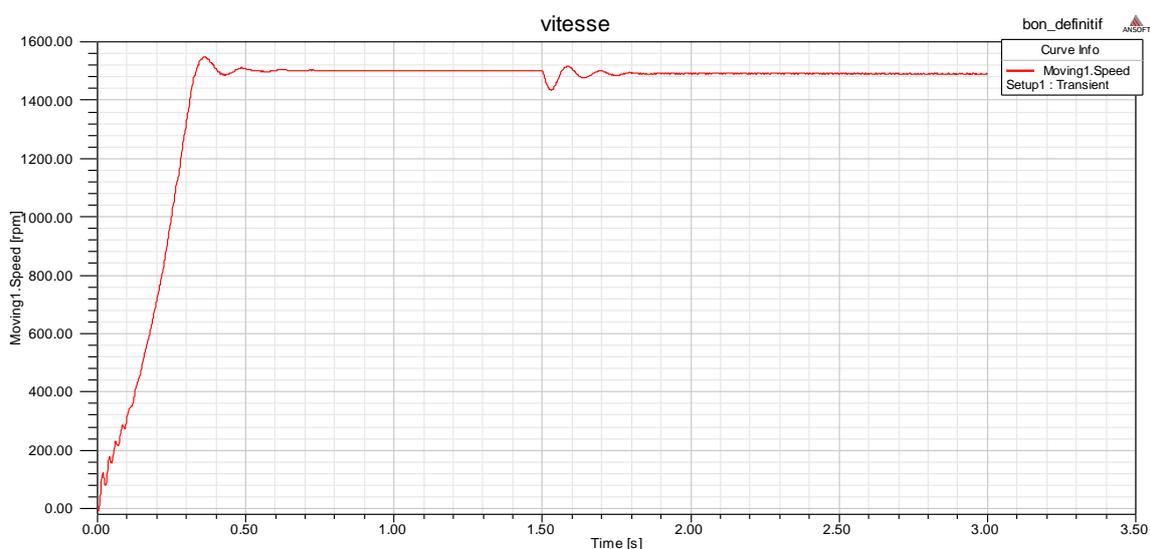


Figure IV. 15: Vitesse du moteur pour une charge 1605.79 N.m

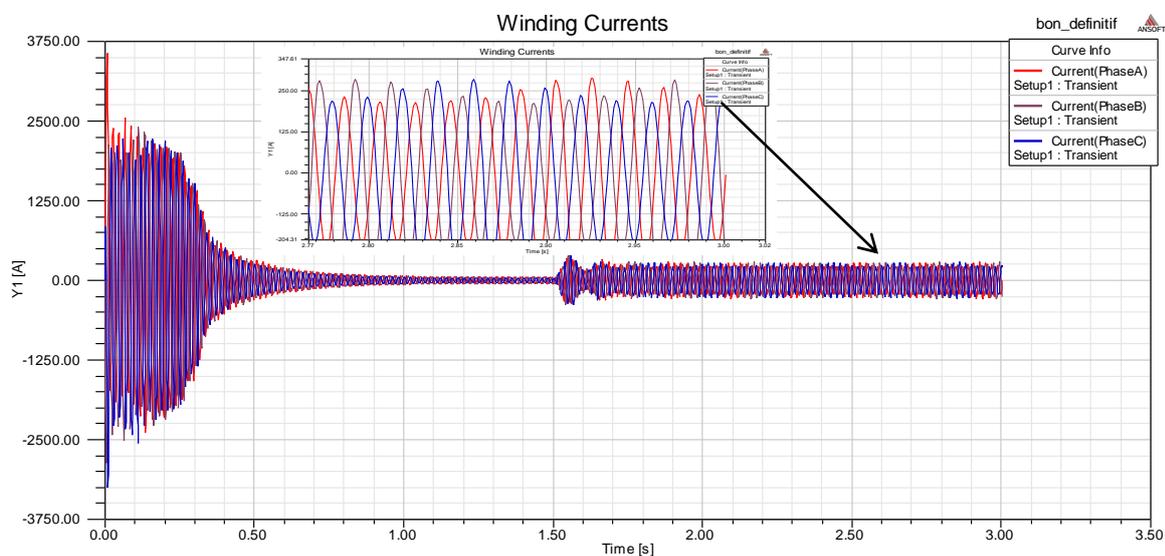


Figure IV. 16: Courant statorique pour une charge de 1200 N.m

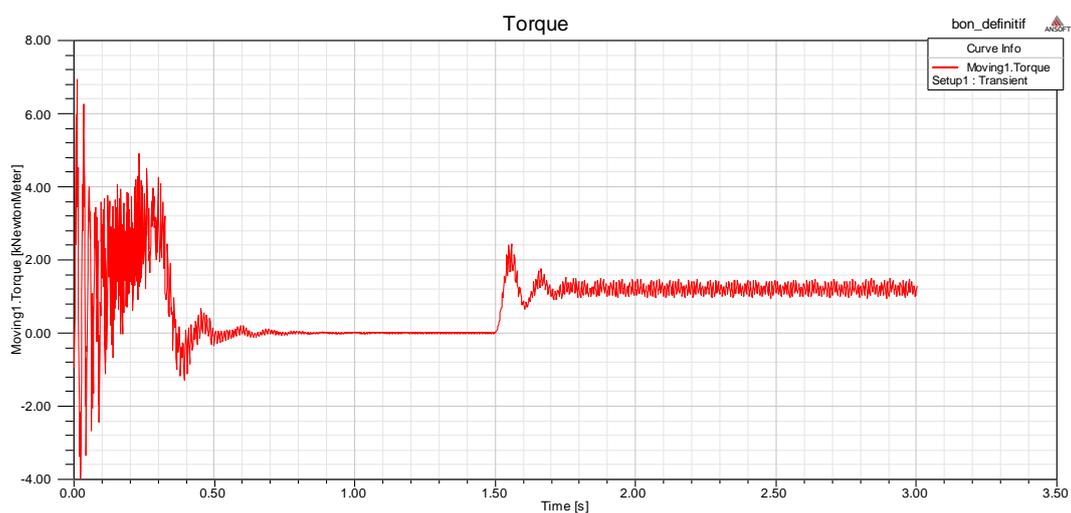


Figure IV. 17: Couple de moteur pour une charge 1200 N.m

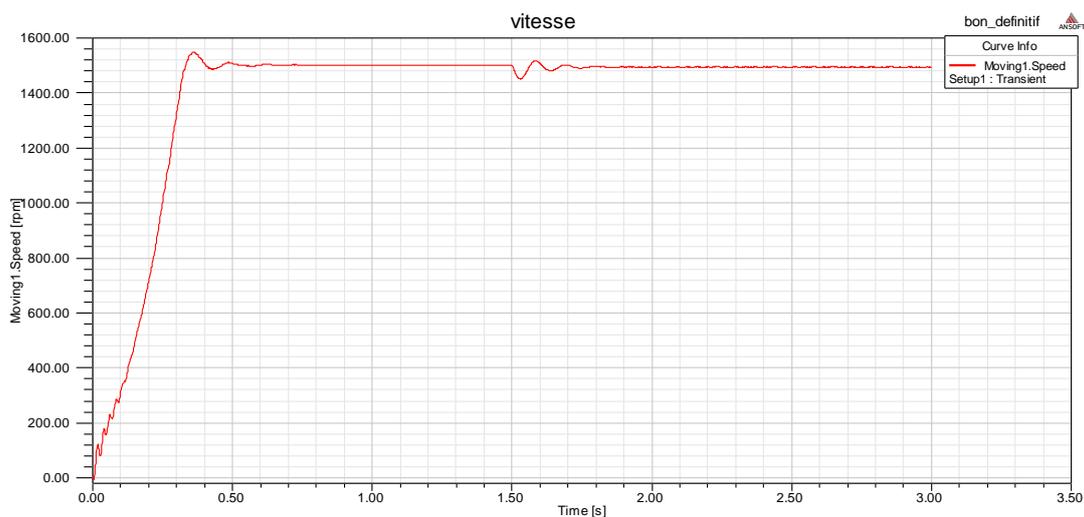


Figure IV. 18: Vitesse du moteur pour une charge 1200 N.m

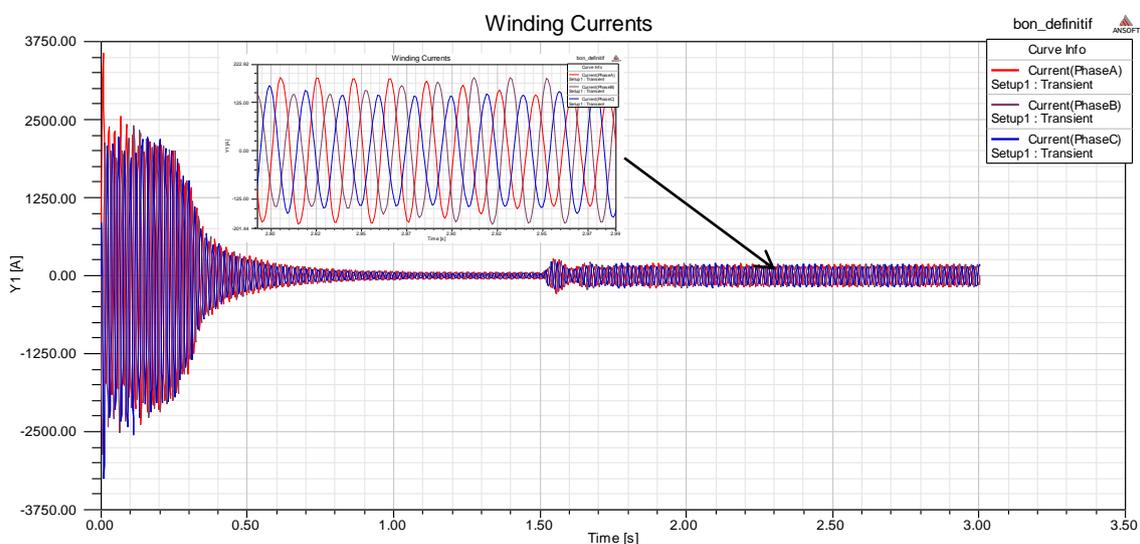


Figure IV. 19: Courant statorique pour une charge de 800 N.m

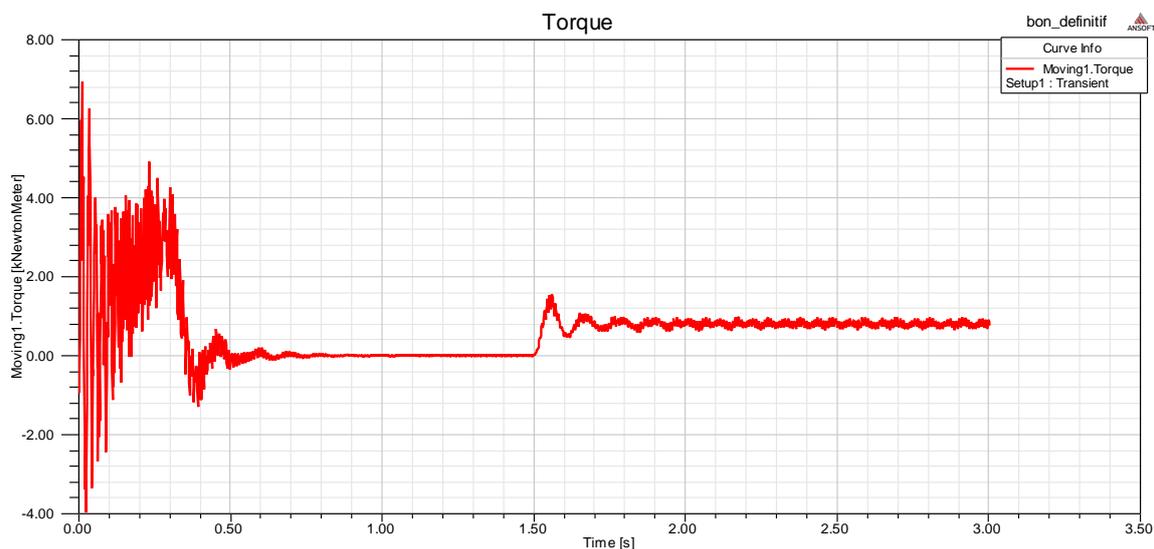


Figure IV. 20: Couple de moteur pour une charge 800 N.m

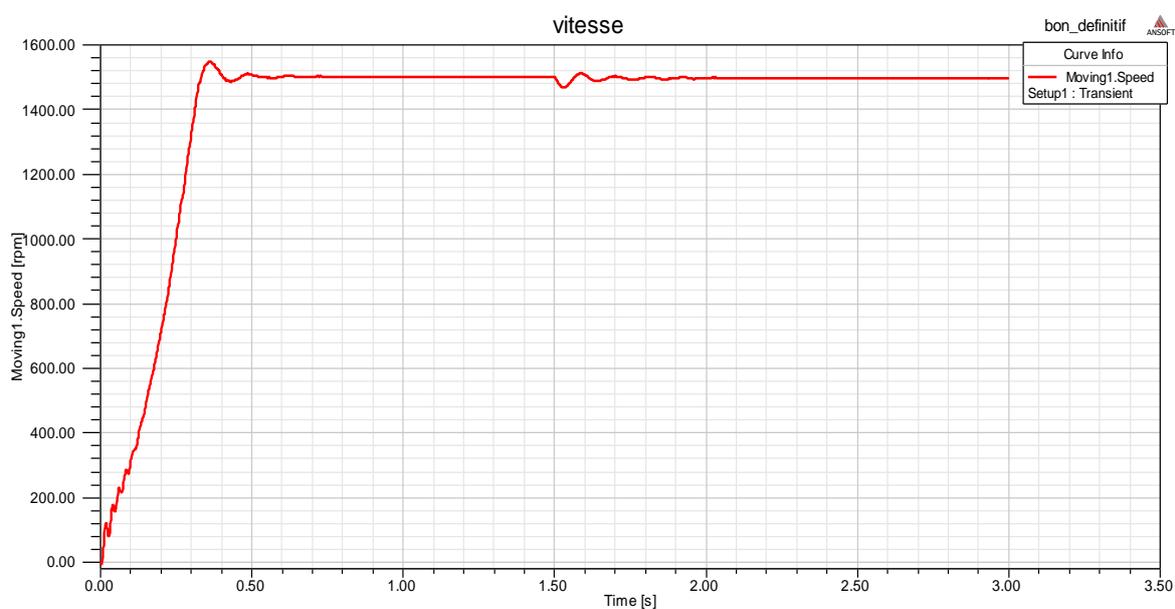


Figure IV. 21: Vitesse du moteur pour une charge 800 N.m

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.

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.11. Induction dans l'entrefer

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

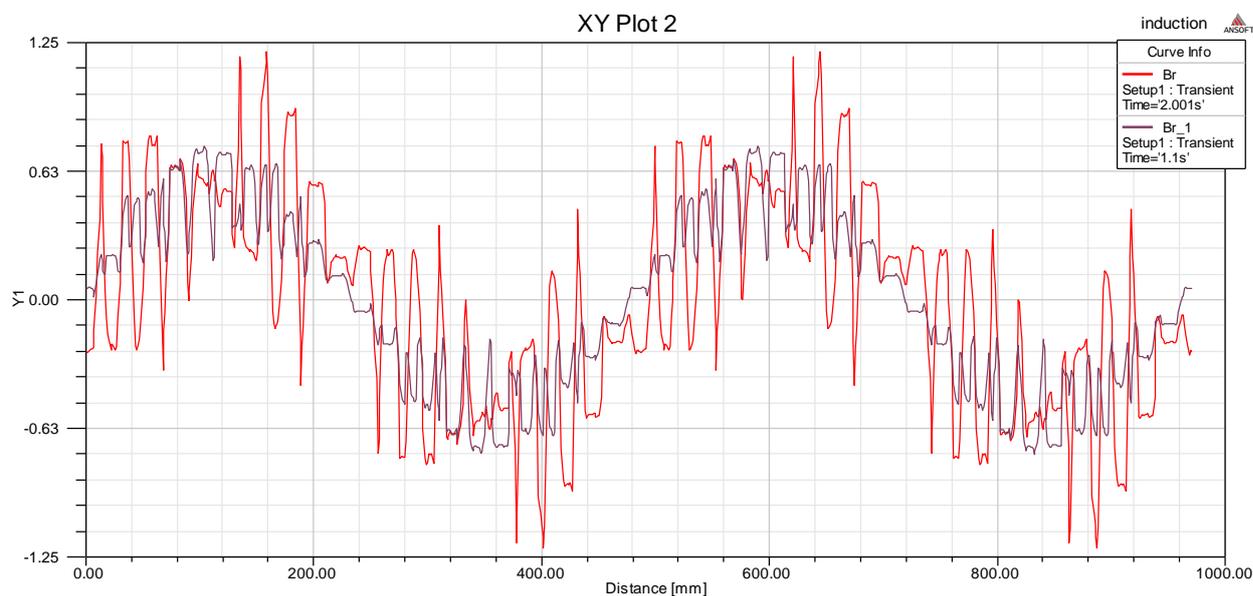


Figure IV. 22: Distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer

Nous observons une augmentation de l'induction en chargeant le moteur ce qui correspond à l'augmentation de la puissance électromagnétique transmise au rotor.

#### IV.12. Cartographies du champ

Les figures (IV.23) et (IV.24) montrent la distribution des lignes de champ, l'induction et les densités des courants induits

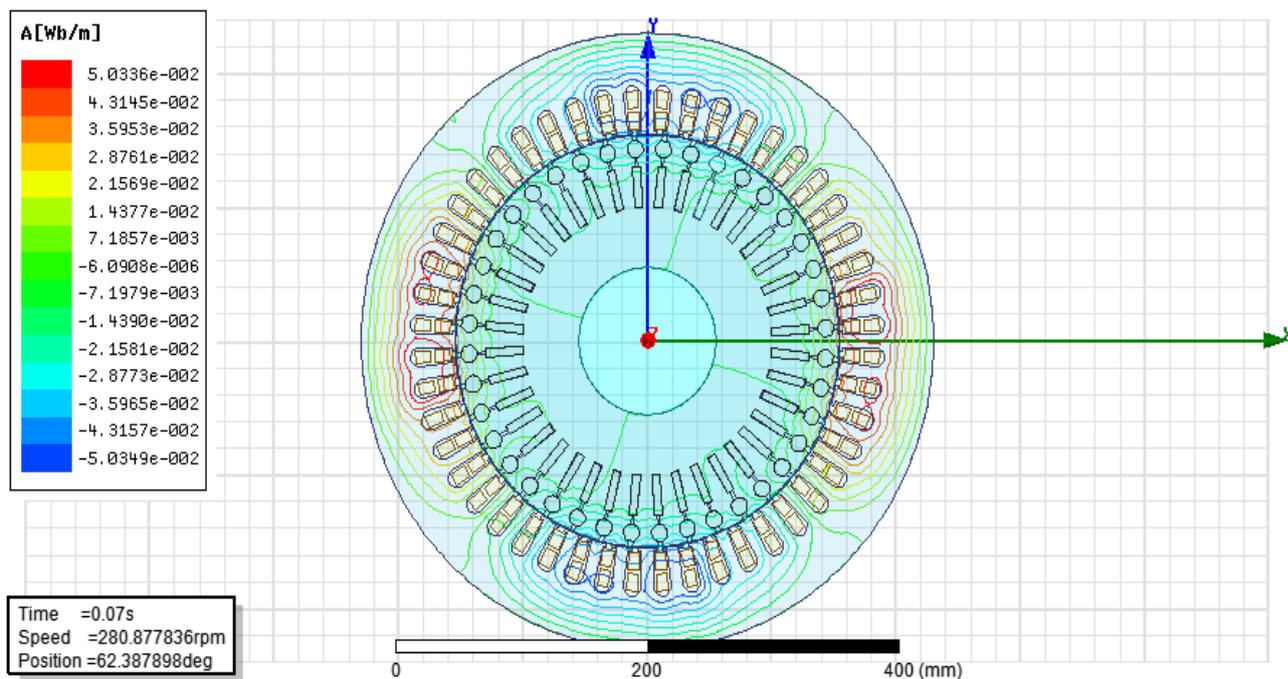


Figure IV. 23: Les lignes de champ

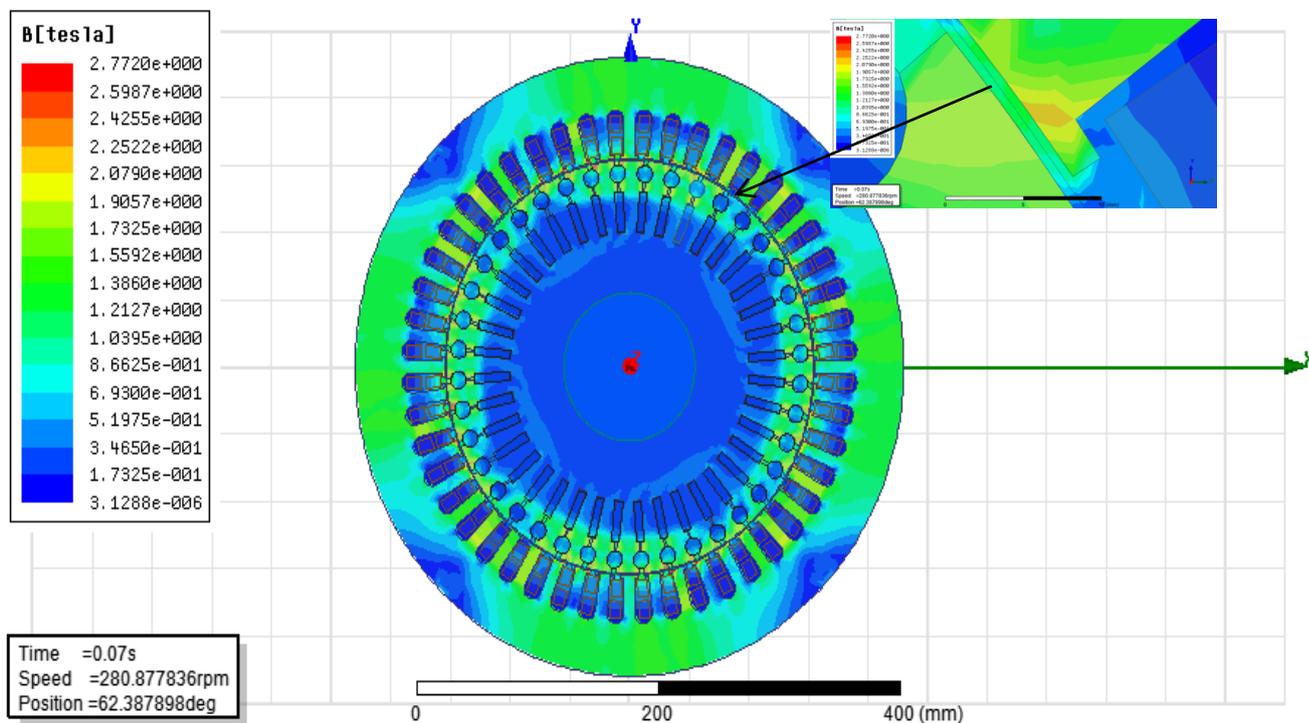


Figure IV. 24: L'induction magnétique

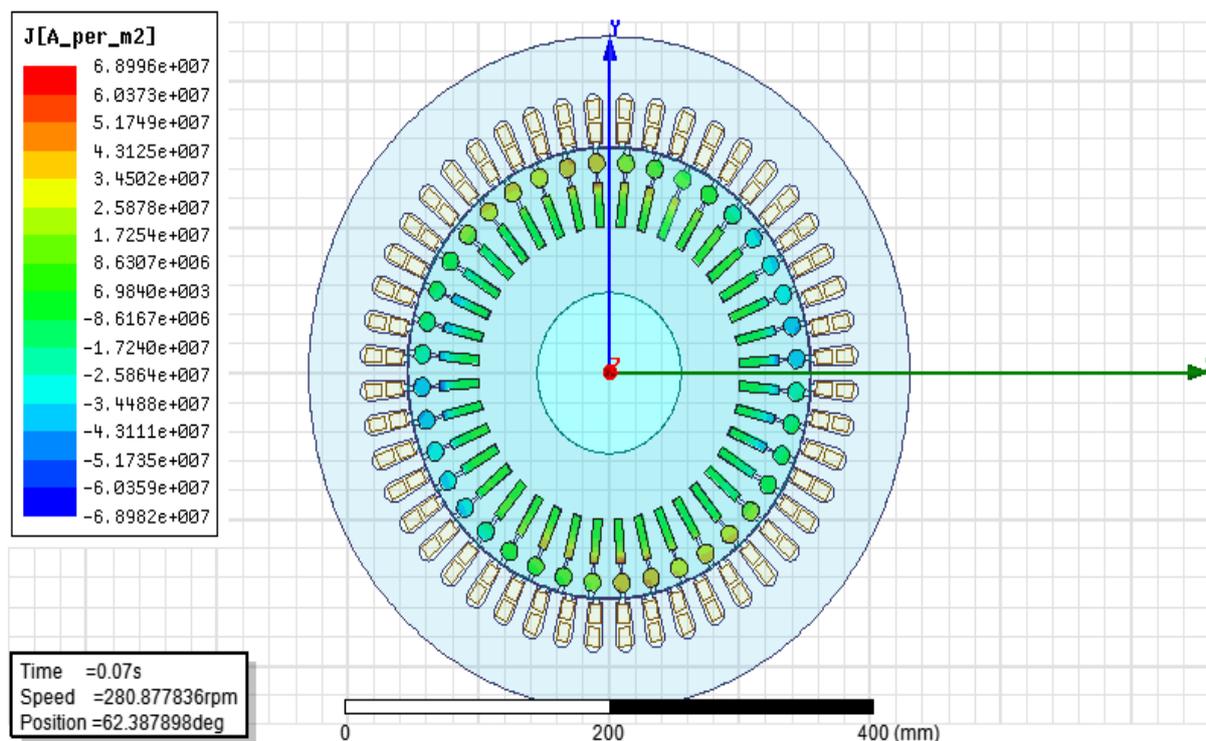


Figure IV. 25: Densité de courant dans les barreaux rotoriques

Les cartographies démontrent que la machine tétra polaires et les valeurs de l'induction et les courants induits concordent bien avec les valeurs mesurées

#### IV.13. Comparaison entre les valeurs analytiques et numériques

Les résultats numériques obtenus montrent une très bonne concordance avec les résultats analytique effectués sur la machine comme le tableau suivant :

Paramètre	Résultats numériques	Résultats analytiques
Induction dans l'entrefer $B_{\delta}$ [T]	0.84	0.83
Courant nominal $I_{n1}$ [A]	254	254.748
Induction max dans la dent statorique $B_{z1}$ [T]	1.9	1.877
Induction dans la dent rotorique $B_{z2}$ [T]	1.24	1.25
Induction dans la culasse statorique $B_{c1}$ [T]	1.5	1.777
Induction dans la culasse rotorique $B_{c2}$ [T]	1.24	1.28
Résistance d'une phase statorique $R_1$ [Ohm]	0.01	0.0117
Courant à vide $I_0$ [A]	43.48	59.08

Tableau IV. 1: Comparaison entre les valeurs analytique et numérique

**IV.14. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons effectué la simulation par la méthode des éléments finis d'un moteur de 250 kW de l'entreprise Electro-Industries.

L'utilisation de logiciel Ansys-Maxwell a permis de faire la simulation des différents régimes de fonctionnements et d'obtenir des résultats électromagnétiques et mécanique très satisfaisants.

Nous avons aussi entrepris une validation des grandeurs électromagnétiques aux résultats de la méthode de « LIWISCHITZ » les résultats obtenus concordent bien avec ceux de la simulation et de la mesure.

# *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 oeuvre, la conception et le dimensionnement du moteur à induction ne sont pas des choses aisées.

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du dimensionnement des moteurs asynchrones à cage d'écureuil. L'approche du dimensionnement adaptée est basée sur un mix entre des relations empiriques issues des méthodes de LIWSCHITZ et une conception assistée par ordinateur utilisant un outil de simulation numérique.

En effet, nous avons, au cours de ce travail, abordé le dimensionnement d'un moteur asynchrone à double cage de 250 kW en cours de fabrication à l'entreprise nationale Electro-Industries d'Azazga.

Dans un premier temps, nous avons utilisé le calcul analytique pour définir les grandeurs géométriques et physiques principales du moteur. Par la suite, nous sommes passés à la simulation numérique de la machine par le logiciel de C.A.O « Ansys- Maxwell » qui permet de résoudre de gros problèmes inhérents à l'activité de conception (prédiction des performances, limitation du nombre de prototypes,...etc).

Les résultats analytiques obtenus ont été confrontés aux résultats numériques. Une très bonne concordance a été observée.

D'autres développements ouvrant de nouvelles perspectives peuvent être faits, par exemple:

- L'optimisation des dimensions géométriques du moteur
- L'amélioration de la qualité de l'onde champ en utilisant les cales magnétiques
- La modélisation du phénomène thermique

# *Bibliographie*

# Bibliographie

- [1] R. Redjem, « Calcul et Conception Assistée par Ordinateur des Machines Electriques, Application aux moteurs asynchrones », Mémoire de Magister, Constantine, 2006.
- [2] M. Belassel, « Etude des machines électriques par CAO », Thèse de doctorat, Constantine, 2007.
- [3] 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.
- [4] C. Birouche, N. Kichou, « dimensionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil », Mémoire d'ingénieur, Tizi Ouzou, 2013.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] O. Ondel, « Diagnostic par reconnaissance des formes : Application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone», Thèse de Doctorat, France, 2006.
- [8] T.Wildy, G.Sybille, « Electrotechnique 4eme édition », édition De Boeck, Paris, 2005.
- [9] C. Chevassu, « Généralités sur les machines électriques tournantes », O1MM 2e année, version de septembre 2012.
- [10] G. Segulier, F. Nottelet, « Electrotechnique industrielle », édition Lavoisier, 1996.
- [11] M. Kostenko, L. Piotrovski, « Machines électriques » tome II, Editions Mir, 1969.
- [12] A . Perret, « Contribution à la conception de moteurs électriques assistée par ordinateur », Thèse de Doctorat, Lausanne, 1984.
- [13] A. Zerrouki, N. Houcini, « Amélioration du rendement d'un mmoteur asynchrone à double cage 75 kW », Mémoire de Master académique. Tizi-Ouzou, 2015.
- [14] J.Chatelain, « Machines électriques», édition Dunod, Paris, 1986.
- [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. Abdessemed, « Electrotechnique : Les enroulements des machines électriques, Différents types, spécificités, conception, placement », édition Ellipses, 2012.
- [17] G. Spinnler, « Conception des machines, principe et applications », édition Lausanne, 1998.
- [18] Brissonneau Pierre « magnétisme et matériaux magnétiques pour l'électrotechnique », Edition Hermes, PARIS, 1997

- [19] A. Kedous-Lebouk, « matériaux magnétiques en génie électrique TOME 1 », Edition Lavoisier, 2006.
- [20] W. Sadaoui, K. Guenoune, « Modélisation par éléments finis d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil », Mémoire de master académique, Boumerdès, 2019.
- [21] M. LIWSHITZ « Calcule des machines électriques, Tome 1 », édition Lausanne, 1967.
- [22] M. LIWSHITZ « Calcule des machines électriques, Tome 2 », édition Lausanne, 1967.
- [23] N. Meghni, « Démarches utiles pour la conception optimale d'une MAS à encoches profondes », Mémoire de master académique, M'Sila, 2016.
- [24] C. Sabonnadière, L. Coulomb, «Calcul des champs électromagnétiques», Technique de l'ingénieur, D 3020.
- [25] B. Boualem, F. Piriou, « Numerical Models for Rotor Cage Induction Machines Using Finite Element Method », IEEE Transactions on Magnetics, 1998.
- [26] 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.

# *Annexes*

# Annexes

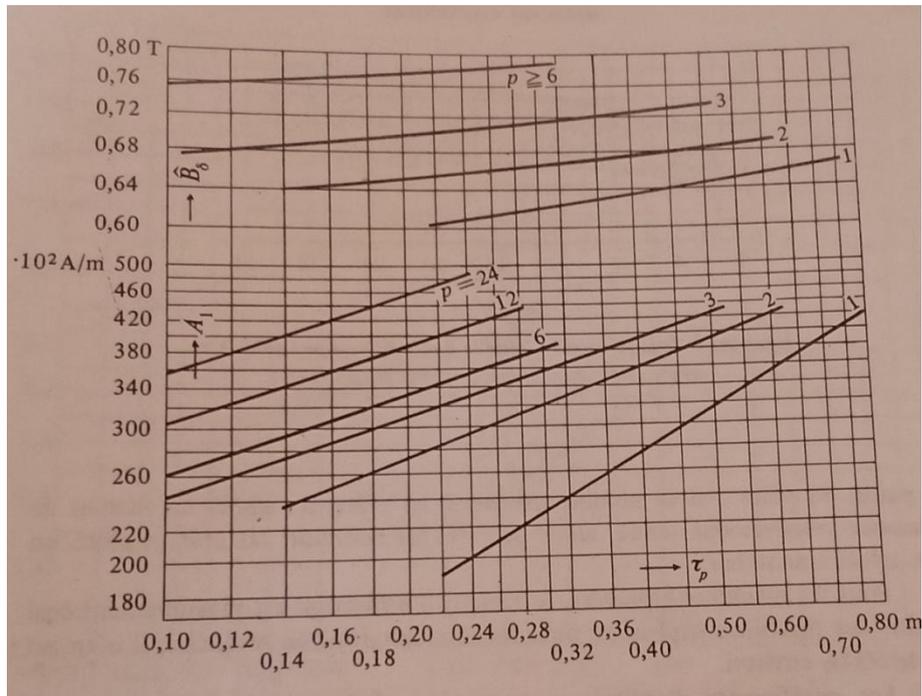


Figure A.1 : Induction  $B_\delta$  dans l'entrefer et densité linéaire  $A_1$  de courant des machines asynchrones en fonction du pas polaire  $\tau_p$ .

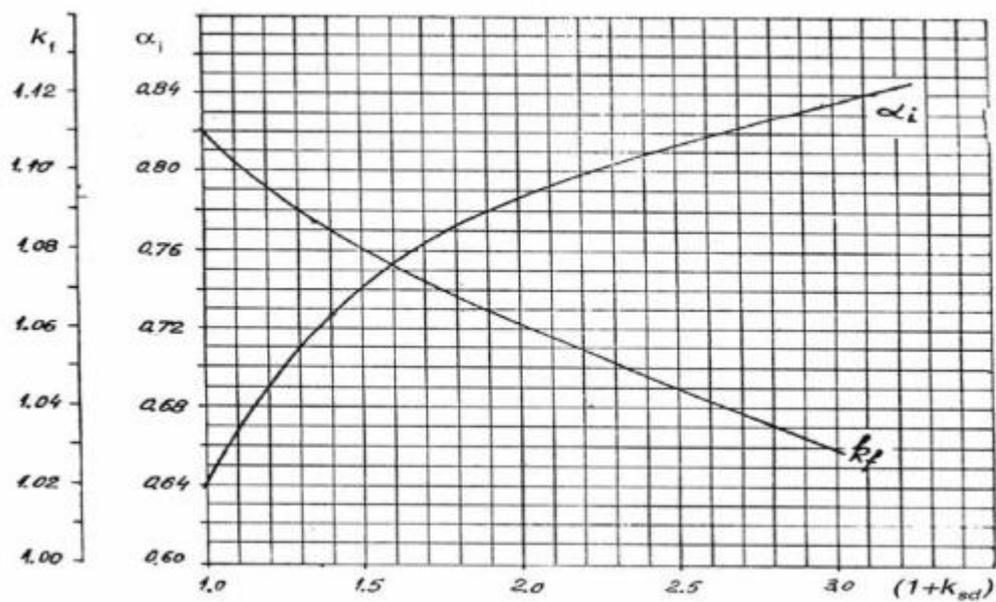


Figure A.2 : Facteur de recouvrement polaire et le facteur de forme en fonction du coefficient de saturation des dents

$Z_2$	$p$	$Z_1$	$Z_2$	$p$	$Z_1$	$Z_2$
28 44	4	48	38 58	5	60	48 52 68 72 74
44 46 62 64 68		72	58 62 82 86 90		90	72 74 76 78 102 104 106 108 112
58 62 82 86 88		96	78 82 110 114 118			

Figure A.3 : Nombre d'encoche rotorique adopté  $Z_2$ .

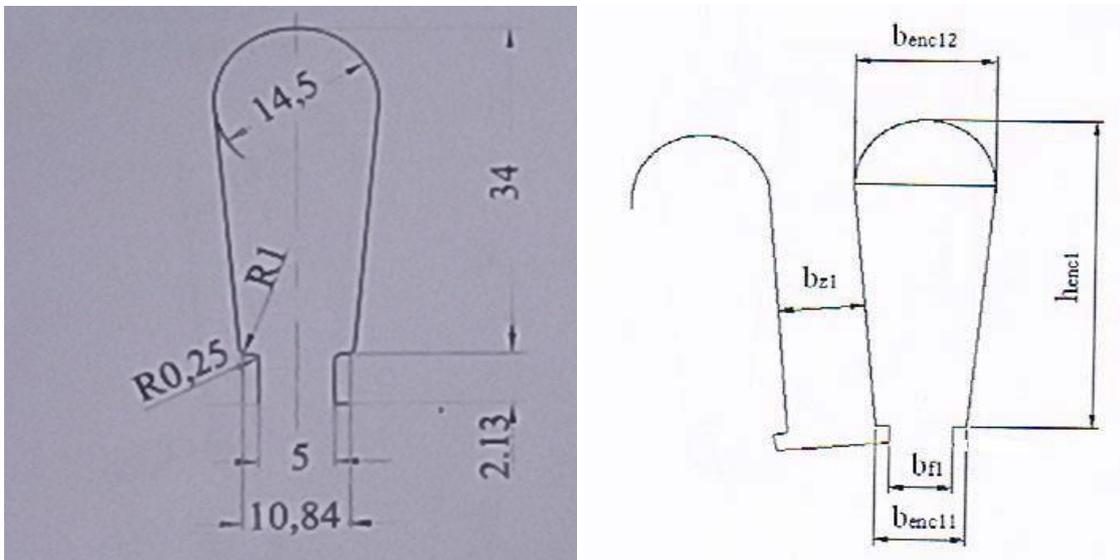


Figure A.4 : Dimensions de l'encoche statorique

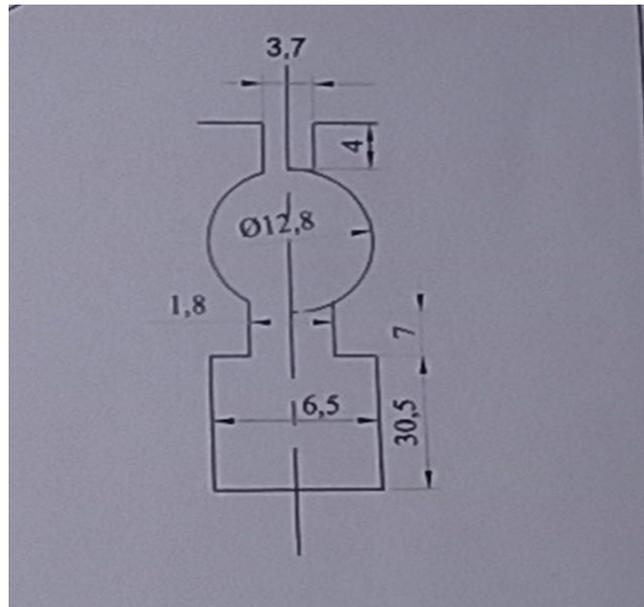


Figure A.5 : Dimensions de l'encoche rotorique

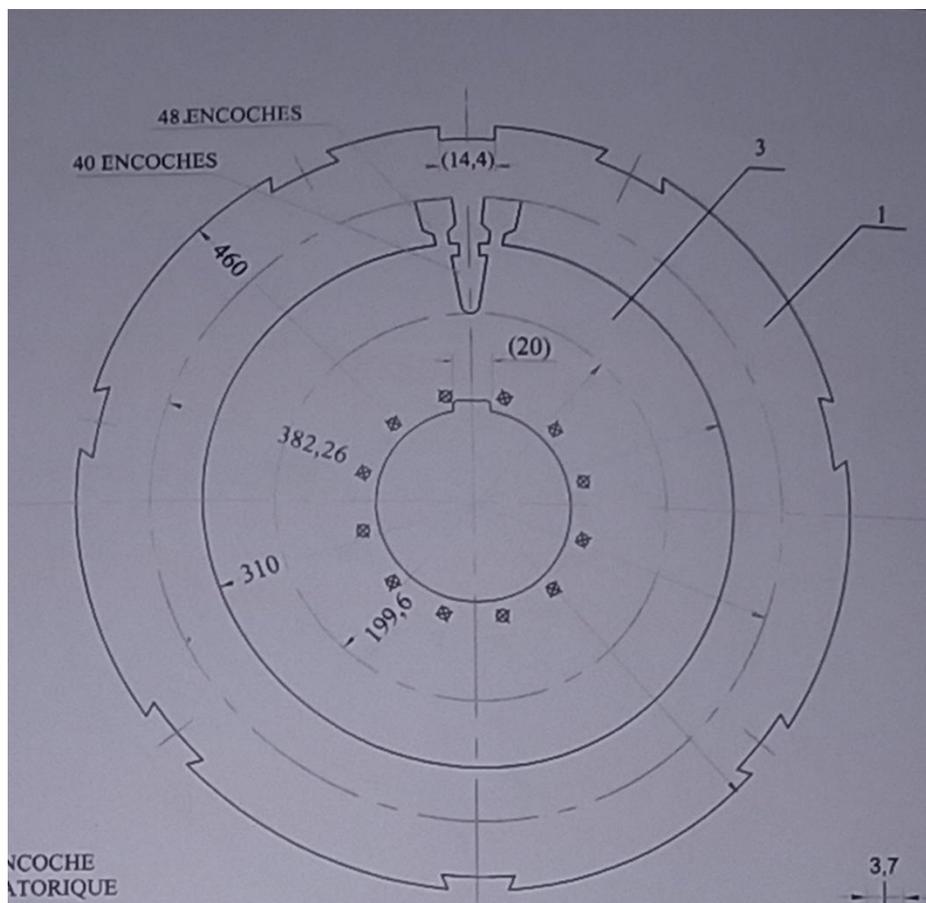


Figure A.6 : Tôles statorique et rotorique

## Résumé

Dans ce mémoire on s'intéresse au calcul d'un moteur asynchrone à double cage de 250 kW et sa simulation à l'aide d'un outil informatique en vue de son dimensionnement afin de satisfaire un cahier de charge. Il présente un cheminement qui discerne un calcul analytique suivi d'un dimensionnement définitif usant d'un logiciel industriel performant.

La partie du calcul analytique utilise la méthode classique de LIWSCHITZ pour le dimensionnement et l'obtention des différents paramètres géométriques et électriques ainsi que les caractéristiques estimées suite aux contraintes imposées par le cahier des charges. Ensuite vient la simulation du moteur préalablement dimensionné en utilisant un logiciel de C.A.O industriel le pro logiciel "Ansys-Maxwell", qui se sert de la méthode des éléments finis pour la simulation des dispositifs électromagnétiques.

## ملخص

في هذه المذكرة نحن مهتمون بحساب محرك غير متزامن مزدوج القفص بقدرة 250 كيلو واط وتصميمه باستخدام أداة كمبيوتر بهدف تحديد مقاسات و مواصفات هذا المحرك. هذا العمل يقدم مسارًا حسابيًا تحليليًا متبوع بتثبيت الأبعاد النهائية و هذا باستخدام برنامج صناعي عالي الأداء.

الحساب التحليلي يستغل طريقة " لوشيتز " الكلاسيكية لتحديد المقاسات والحصول على الخصائص الهندسية والكهربائية المختلفة بالإضافة إلى الخصائص الموجودة في دفتر الشروط. ثم يأتي تصميم المحرك ذات الأبعاد السابقة باستخدام برنامج صناعي محترف " انسيس ماكسول " ، الذي يستخدم طريقة العناصر المنتهية لتصميم الأجهزة الكهرومغناطيسية.