

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE 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. SADAoui Walid**

**Mr. GUENNOUN Khaled**

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machines Electriques

---

## Modélisation par éléments finis d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil

---

**Soutenu le 09 juillet 2019 devant le jury :**

Mme. ABDESLAME	Djamila	MAA	UMBB	Président
Mr. HAMEL	Meziane	MCB	UMBB	Encadreur
Mme. HACHICHE	Nadjet	Ingénieur	Electro-Industries	Co-encadreur
Mr. BOUZIDA	Ahcène	MCA	UMBB	Examinateur
Mlle. LARABI	Zina	MAA	UMBB	Examinateur

Année Universitaire : 2018/2019

Electro-Industries



# *Remerciements*

## *Remerciements*

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Département d'Ingénierie des Systèmes Electriques (ISE) de l'université M'Hamed BOUGARA de Boumerdès (UMBB).

Nous remercions tout d'abord Madame ABDESLAME Djamila, MAA à l'UMBB, de nous avoir fait l'honneur de présider le jury de notre soutenance.

Par la suite, nous remercions et nous témoignons nos profonds respects à Monsieur HAMEL Meziane, MCB à l'UMBB, pour nous avoir proposé ce sujet, encadré et bien suivi tout au long de notre travail. Sa disponibilité et surtout les conseils avisés qu'il nous a prodigué témoignent de ses qualités scientifiques et humaines.

Nous remercions Monsieur FAHEM Nour Eddine, pour ses suggestions et aide en matière de programmation.

Nous remercions aussi Madame HACHICHE Nadjat, Ingénieur à Électro-Industries, pour son encadrement au sein de l'entreprise. On tient à la remercier pour son soutien continu et sa grande disponibilité pour nous diriger et accompagner pour bien assimiler les différents processus de fabrication des moteurs.

Nos remerciements s'adressent aussi à Madame HADJAZ Sadia, Ingénieur à Électro-Industries, pour la confiance et l'intérêt qu'elle a témoigné tout au long de la réalisation de ce travail. Qu'elle trouve ici l'expression de notre profonde reconnaissance.

Nous adressons nos sincères remerciements à Monsieur MANSOUR Mourad, Ingénieur à Électro-Industries, pour sa présence quotidienne et ses conseils judicieux lors de nos visites aux différents ateliers.

Nous remercions vivement, Mademoiselle LARABI Zina, MAA à l'UMBB, et Monsieur BOUZIDA Ahcène, MCA à l'UMBB, pour avoir accepté d'être parmi les membres du jury.

Enfin, nous exprimons notre gratitude et reconnaissance à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

# *Dédicaces*

# ***Dédicaces***

***Je dédie ce travail :***

***A la personne la plus chère mes yeux, ma mère qui a sacrifié pour nous grandissons, qui a veillé toujours à notre éducation, qui sans elle je ne serai pas que ne je suis.***

***A mon père que j'adore, qu'il utilise tout les modèles de sacrifice pour grandissons et pour donner toujours le meilleur, en bref c grâce à lui.***

***A mon oncle BELAJD Mohamed qui je le trouve à mon côté tout le temps.***

***A mes sœurs qu'elles sont le fondamentalement et le goût de ma vie.***

***A mon grand père et mes grandes mères.***

***A ma famille.***

***A mes chères amies.***

***Je ferais une exception à mon amie Mr. FAHEM Nour Eddine.***

***Sans oublier mon binôme Dadi.***

**Walid**

# ***Dédicaces***

***Je dédie ce travail :***

***A mes très chers parents qui ont toujours été là pour leur soutien Leur  
patience, leur encouragement durant mon Parcours scolaire.***

***J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout  
mon amour***

***A mes chers frères et mes chères sœurs ainsi à tout ma famille en  
témoignage de mon profond respect***

***A mes amis (es) et mes meilleurs amis AOUACHE Hamza***

***Et AYADJ Fatah***

***Sans oublier mon binôme Walid***

***Enfin, à tous les gens qui m'ont aidé dans ma vie***

***Khaled***

# *Sommaire*

## Sommaire

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.....	4
I. 4. Organigramme de l'entreprise .....	5
I. 5 .Présentation de l'unité Moteurs Asynchrones et Générateurs Electriques (UMAGE).....	5
I. 5. 1. Atelier découpage.....	6
I. 5. 1. 1. Fabrication des tôles statoriques et rotoriques.....	6
I. 5. 1. 2. Procédés de découpage .....	6
I. 5. 1. 3. Empaquetage .....	7
I. 5. 1. 3. 1. Empaquetage du paquet statorique.....	7
I. 5. 1. 3. 2. Empaquetage du paquet rotorique .....	8
I. 5. 1. 4. Fabrications des capots ventilateurs :.....	8
I. 5. 2. Atelier moulage sous pression.....	9
I. 5. 2. 1. Injection d'aluminium pour le rotor .....	9
I. 5. 2. 2. Fabrication des flasques et les carcasses .....	9
I. 5. 3. Atelier d'usinage .....	9
I. 5. 4. Atelier de bobinage .....	13
I. 5. 4. 1. Secteur préparation isolation .....	13
I. 5. 4. 2. Secteur préparation bobines.....	13
I. 5. 4. 3. Secteur préparation du stator bobiné .....	14
I. 5. 4. 3. 1. Insertion des caniveaux du stator bobiné .....	14
I. 5. 4. 3. 2. Insertion des bobines dans le stator .....	15
I. 5. 5. Atelier montage .....	16
I. 5. 5. 1. Le montage .....	16
I. 5. 5. 2. Contrôle final des moteurs :.....	16
I. 5. 5. 2. 1. Le contrôle visuel.....	17
I. 5. 5. 2. 2. Les contrôles électriques .....	17

I. 6. Service après-vente .....	18
I. 7. Conclusion .....	18

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

II. 1. Introduction .....	19
II. 2. Construction du moteur asynchrone triphasé .....	19
II. 2. 1. Le Stator .....	20
II. 2. 2. Le Rotor .....	21
II. 3. Principe de fonctionnement .....	22
II. 4. Bobinage .....	24
II. 4. 1. Bobinage imbriqué .....	24
II. 4. 2. Bobinage imbriqué à double couche .....	25
II. 4. 3. Bobinage ondulé .....	26
II. 4. 4. Bobinage concentrique .....	27
II. 5. Matériaux dans les machines électriques .....	27
II. 5. 1. Matériaux magnétiques .....	28
II. 5. 2. Matériaux conducteurs .....	30
II. 5. 3. Matériaux Isolants- Classe d'isolation .....	31
II. 6. Classification des moteurs à cage d'écureuil .....	33
II. 6. 1. La différence entre ces classes .....	35
II. 7. Méthodes de dimensionnement et calcul des machines électriques .....	36
II. 7. 1. Première Méthode .....	36
II. 7. 2. Deuxième Méthode .....	36
II. 7. 3. Troisième méthode « calcul de LIWISTCHZ » .....	37
II. 7. 4. . Quatrième Méthode .....	37
II. 8. Conclusion .....	37

## Chapitres III : Modélisation numériques des moteurs asynchrones

III. 1. Introduction .....	38
III. 2. Mise en équation .....	38
III. 2. 1. Equations de base .....	38
III. 3. Formulation magnétodynamique .....	40
III. 3. 1. Introduction des potentiels.....	40
III. 3. 2. Formulation en champ électrique $\vec{E}$ .....	40
III. 3. 3. Formulation en champ magnétique $\vec{H}$ .....	40
III. 3. 4. Formulation électrique $\vec{A} - V$ .....	41
III. 4. Les équations des machines asynchrone à cage pour différents régions.....	42
III. 5. Méthodes numériques .....	42
III. 5. 1. La méthode des différences finies .....	42
III. 5. 2. La méthode des éléments finis.....	42
III. 5. 2. 1. Approximation par la MEF .....	43
III. 5. 2. 2. Etapes de résolution par la MEF.....	43
III. 5. 2. 3. Méthode des résidus pondérés .....	44
III. 5. 2. 3. 1. Principe de la méthode .....	44
III. 5. 2. 3. 2. Différentes méthodes déduites des résidus pondérés .....	44
III. 5. 2. 3. 3. La discrétisation .....	44
III. 6. Formulation éléments finis de l'équation magnétodynamique .....	47
III. 7. Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis.....	49
III. 7. 1 Avantages .....	49
III. 7. 2 Inconvénients.....	49
III. 8. Méthodes de calcul de la force magnétique .....	49
III. 9. La méthode de la variation de la Co-énergie.....	50
III. 10. Conclusion.....	50

## Chapitre IV : Applications et resultats

IV. 1. Introduction.....	51
IV. 2. Présentation de la machine.....	51
IV. 3. Présentation du logiciel Ans Maxwell .....	52
IV. 4. Simulation de la machine .....	54
IV. 4. 1. Calcul du bobinage.....	55
IV. 4. 2. La Courbe de première aimantation .....	56
IV. 5. Caractéristiques électriques et mécaniques .....	57
IV. 6. Essai à vide.....	58
IV. 6. 1. Variation de la fréquence d'alimentation .....	60
IV. 7. Essai en charge.....	61
IV. 7. 1. Induction dans l'entrefer .....	64
IV. 7. 2. Cartographies du champ.....	65
IV. 8. Calcul les paramètres électromagnétiques .....	66
IV. 8 .1. Puissance électromagnétique.....	66
IV. 8 .2. Force électromotrice.....	66
IV. 8 .3. Facteur de bobinage.....	66
IV.8 .4. Facteur de distribution.....	67
IV.8.5. Facteur de raccourcissement .....	67
IV.8 .6.Facteur d'obliquité.....	67
IV.8 .7. Flux sous un pôle.....	67
IV.8 .8. L'induction de l'entrefer .....	67
IV.8 .9. Le courant nominal de la machine.....	68
IV.8 .10. La Charge linéaire .....	68
IV.8 .11. La résistance d'une phase statorique .....	68
IV.8 .12. L'inductance statorique .....	68

IV.9 .Application numérique.....	69
IV.10. Comparaison entre les valeurs calculées, mesurées et simulées.....	70
IV.11.Conclusion .....	70
Conclusion générale.....	71
Bibliographie	
Annexes	

# *Liste des figures*

## Liste des figures

Figure I. 1 : Logo de l'entreprise Electro-Industries.....	4
Figure I .2 : Vue satellitaire du site de l'entreprise .....	4
Figure I.3 :L'organigramme de l'entreprise.....	5
Figure I. 4 : Rouleaux de tôle magnétique.....	6
Figure I. 5 : Procèdes de découpage .....	7
Figure I. 6 : Tôles statoriques et rotoriques .....	7
Figure I. 7 : Paquet statoriques .....	8
Figure I. 8 : Paquet rotoriques .....	8
Figure I. 9 : Capot de ventilateur.....	9
Figure I. 10 : Arbre d'un moteur électrique après usinage.....	10
Figure I. 11 : Fraisage de clavettes .....	11
Figure I.12 : Rotor à cage moulé.....	11
Figure I.13 : Rotor double cage.....	11
Figure I. 14 : Boite à bornes en fonte usinée.....	11
Figure I.15 : Boite à bornes en alliage aluminium usiné .....	11
Figure I.16: Flasque AS usiné.....	12
Figure I.17 : Flasque BS usiné.....	12
Figure I.18: Flasque à bride usiné.....	12
Figure I.19: Carcasses fonte usinée.....	13
Figure I.20: carcasse métal coulé (Aluminium).....	13
Figure I. 21: Bobineuse de fil électrique.....	14
Figure I.22 : Bobineuse automatique.....	14
Figure I. 23 : Préparation des bobines.....	14

Figure I.24 Stator avec caniveau d'encoches isolés .....	15
Figure I.25 : Insertion automatique dans les encoches d'un stator .....	15
Figure I.26 : Stator bobiné isolé.....	15
Figure I.27 : Pré montage du stator dans la carcasse .....	16
Figure I.28 : stator bobiné monté dans une carcasse.....	16
Figure I.29 : Contrôle de polarité.....	17
Figure I.30 : Contrôle d'isolation.....	17
Figure I.31 : Stator après le frettage et contrôle .....	17
Figure II. 1 : Vue éclatée du moteur asynchrone.....	20
Figure II. 2 : Stator.....	21
Figure II. 3 : Rotor a cage d'écureuil .....	22
Figure II. 4 : Interactions rotor stator .....	23
Figure II. 5 : Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone .....	23
Figure II. 6 : Enroulement imbriqué à une couche, une paire de pôles, 12 encoches.....	25
Figure II. 7 : Enroulement imbriqué mais pour deux tours de fil et connexion en triangle.....	25
Figure II. 8 : Enroulement imbriqué double couche. Moteur 3 phases, 4 pôles, 36 encoches.....	26
Figure II. 9 : Enroulement ondulé d'une phase. Moteur à 4 pôles et 36 encoches.....	26
Figure II. 10 : Enroulement concentrique. Moteur à une paire de pôles et 24 encoches.....	27
Figure. II. 11 : Différentes isolations dans l'encoche .....	32
Figure II. 12 : Formes d'encoche rotorique pour différentes classes de moteur.....	34
Figure II.13 : Courbes couple/vitesse en fonction de la classe du moteur.....	35
Figure III. 1 : Domaine d'étude.....	38
Figure III. 2 : Éléments à une dimension.....	45

Figure III. 3 : Éléments à de dimensions .....	45
Figure III. 4 : Éléments carrés.....	46
Figure. III.5 : Éléments à trois dimensions.....	46
Figure III. 6 : Triangle de Pascal.....	47
Figure IV.1 : moteur asynchrone à cage d'écureuil 15 kW .....	52
Figure IV. 2 : Organigramme de simulation.....	53
Figure IV. 3 : Interface de logiciel Ansys-Maxwell .....	54
Figure IV. 4: Coupe transversale de la machine sous l'environnement Ansys-Maxwell.....	54
Figure IV. 5 : maillage de moteur.....	55
Figure IV. 6: Distribution de bobinage .....	56
Figure IV.7 : courbe de première de la tôle magnétique utilisée à Electro-Industries.....	57
Figure IV. 8 : Courant de phase en fonction de la vitesse.....	57
Figure IV. 9 : Couple du moteur en fonction de la vitesse.....	58
Figure IV. 10 : Courants statoriques à vide.....	59
Figure IV. 11 : Couple du moteur à vide.....	59
Figure IV. 12 : Vitesse du moteur à vide.....	60
Figure IV. 13: Vitesse du moteur en fonction de la fréquence d'alimentation.....	60
Figure IV. 14 : Courant statorique pour une charge de 97.28 N.m.....	61
Figure IV.15 : Couple de moteur pour une charge 97.28 N.m.....	61
Figure IV. 16 : Vitesse du moteur pour une charge 97.28 N.m.....	62
Figure IV. 17 : Courant statorique pour une charge de 80 N.m.....	62
Figure IV. 18 : Couple de moteur pour une charge 80 N.m.....	62
Figure IV. 19 : Vitesse du moteur pour une charge 80 N.m.....	63
Figure IV. 20 : Courant statorique pour une charge de 60 N.m.....	63

Figure IV. 21 : Couple de moteur pour une charge 60 N.m.....	63
Figure IV. 22 : Vitesse du moteur pour une charge 60 N.m.....	64
Figure IV. 23 : Distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer.....	64
Figure IV.24 : Les lignes de champs.....	65
Figure IV. 25 : L'induction magnétique.....	65
Figure IV. 26 : Densité de courant dans les barres rotoriques .....	66

# *Liste des tableaux*

## Liste des tableaux

Tableau II.1 : Caractéristiques de Quelques Matériaux Magnétiques Doux (à température ambiante).....	29
Tableau II.2 : Caractéristiques de Quelques Matériaux Magnétiques Durs (aimants).....	29
Tableau II.3 : Caractéristiques de Quelques Matériaux conducteurs Résistivité à 20°Celsius en ohm-mètre, $\Omega \cdot m$ .....	31
Tableau II.4 : Classification des Matériaux d'Isolants.....	33
Tableau IV .1 : cahier de charge de la machine étudié.....	51
Tableau IV. 2 : Tableau illustratives des résultats paramètres de bobinages.....	56
Tableau IV.3 : application numérique des paramètres électromagnétiques.....	69
Tableau IV.4 : Comparaison entre les valeurs calculées, mesurées et simulées.....	70

# *Liste des symboles*

## Liste des symboles

$a_1$  : Nombre de voie parallèles

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

$A$  : Charge linéaire. [A.m]

$B$  : Induction magnétique. [T]

$B_\delta$  : Induction dans l'entrefer. [T]

$b_{l\text{moy}}$  : Largeur moyenne d'une section. [mm]

$b_{\text{enc1}}$  : Largeur de l'encoche statorique. [mm]

$b_{f1}$  : Largeur de la fente de l'encoche statorique. [mm]

C.A.O : Conception Assistés par Ordinateur

$C_{\text{em}}$  : Couple électromagnétique [N.m].

$C_r$  : Couple résistant [N.m].

$D$  : Induction électrique. [C/m<sup>2</sup>]

$D_1$  : Diamètre extérieur du stator. [mm]

$e$  : Epaisseur de l'entrefer de la machine. [mm]

$E$  : Champ électrique. [V/m]

$E_1$  : Force électromotrice [V].

E-I : Electro-industries.

$f$  : Fréquence du réseau d'alimentation. [Hz]

$g$  : Glissement

$H$  : Champ magnétique [A /m].

$h_{f1}$  : Hauteur de la fente de l'encoche statorique. [mm]

$h_{k1}$  : Hauteur de la clavette. [mm]

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

$I_n$  : Courant nominal de la machine [A].

$J$  : Moment d'inertie.

$J_c$  : Densité de courant [ $A/m^2$ ].

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

$\vec{J}_{\text{eddy}}$  : Densité de courant de Foucault.

$K_{B1}$  et  $K_{B2}$  : Coefficients qui tiennent compte de la diminution de la dispersion.

$K_c$  : Coefficient de KARTER

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

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

$K_{\text{enc1}}$  : Facteur de bobinage

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

$K_{\text{ob}}$  : Facteur d'obliquité des encoches rotorique

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

$L$  : Laplacien.

$L_i$  : Longueur de la machine. [mm]

$L_{w1}$  : Longueur moyenne d'une spire de l'enroulement statorique. [mm]

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

$L_1$  : Inductance statorique. [H]

$M$  : Aimantation.

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

$m_1$  : Nombre de phase de la machine.

$N$  : Nombre de nœuds dans le domaine d'études.

$N_{el}$  : Nombre de conducteurs élémentaires.

$N_n$  : Vitesse de rotation du rotor. [tr /min]

$N_s$  : Vitesse de synchronisme. [tr /min]

NEMA : National Electrical Manufacturers Association

$p$  : Nombre de paires de pôles.

$P_{em}$  : Puissance électromagnétique. [W]

$P_n$  : Puissance nominale de la machine. [W]

$q_1$  : Nombre d'encoche par pôles et par phases

$q_{eff}$  : Section effective d'un conducteur. [mm<sup>2</sup>]

$R_1$  : Résistance d'une phase statorique. [ $\Omega$ ]

$T$  : Température. [C°]

$T_0$  : Température ambiante. [C°]

$\vec{T}$  : Vecteur potentiel électrique.

$t_1$  : Pas dentaire statorique.

$U_n$  : Tension d'alimentation. [V]

$U_1$  : Tension simple statorique. [V]

$V$  : Potentiel scalaire électrique.

$w_1$  : Nombre de spires en série d'une phase d'enroulement statorique

$X_1$  : Réactance statorique [ $\Omega$ ].

$y_1$  : Pas d'enroulement.

$y_{1moy}$  : Pas moyen d'un groupe de section.

$Z_1$  : Nombre d'encoche statorique.

$\eta$  : Rendement de la machine

$\cos \varphi$  : Facteur de puissance de la machine

$\tau$  : Pas polaire

$\Phi$  : Flux magnétique sous un pôle. [Wb]

$\Phi_r$  : Vecteur potentiel magnétique. [Wb]

$\alpha_i$  : Coefficient de recouvrement polaire ( $\alpha_i = \frac{2}{\pi}$ )

$\rho$  : Résistivité. [ $\Omega \cdot m$ ]

$\rho_{cu}$  : Résistivité du cuivre. [ $\Omega \cdot m$ ]

$\Omega$  : domaine d'étude.

$\rho$  : Densité volumique de charge électrique. [ $C/m^3$ ]

$\mu_0$  : Perméabilité magnétique du vide.  $4\pi \cdot 10^{-7}$  [H/m]

$\mu_r$  : Perméabilité magnétique relative du milieu.

$\mu$  : Perméabilité magnétique absolue.

$\sigma$  : Conductivité électrique

$\varepsilon$  : Permittivité électrique absolue.

$\varepsilon_0$  : Permittivité électrique à vide.

$\varepsilon_r$  : Permittivité électrique relative du milieu.  $\frac{1}{36\pi} 10^9$  [F/m]

$\alpha$  : Décalage entre deux phases consécutives.

$\beta$  : Rapport de raccourcissement.

$\lambda_{if1}$  : Coefficient de perméance frontale au stator.

$\lambda_{id1}$  : Coefficient de perméance différentielle.

$\lambda_{encl}$  : Coefficient perméance d'encoche

$\theta_r$ : Angle de raccourcissement.

$\theta_e$  : Angle électrique

$\theta_{\text{géo}}$  : Angle géométrique

# *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].

Ainsi et désormais 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.

Dans ce contexte, la modélisation et la simulation des machines électriques constituent une étape primordiale en matière de la conception assistée par ordinateur (CAO). Elles permettent la compréhension des différents régimes de fonctionnement et la vérification sur prototype virtuel de l'efficacité des modèles implémentés. Parmi les approches de modélisations existantes, nous allons nous baser sur la méthode des éléments finis.

Cette méthode est basée sur la résolution numérique des équations de Maxwell. Les informations fournies par ce type de simulation sont d'une grande précision et elles nous apportent la prise en compte de la géométrie de la machine, la saturation des matériaux magnétiques, ainsi que l'effet de peau dans les barres rotoriques, lorsque le problème est correctement posé (géométrie, caractéristiques physiques...) et que l'on utilise le mode de résolution adéquat (magnétostatique ou magnétodynamique). D'autre part, on peut simuler différents scénarios d'un point de vue alimentation (tension, fréquence), en modifiant, directement, les paramètres dans le programme du calcul (Logiciel) d'où une grande souplesse d'utilisation [2].

L'objectif principal de ce projet est d'être capable, à partir de la géométrie d'un moteur asynchrone existant et des matériaux qui le composent, de déterminer les caractéristiques et performances du moteur en vue de son optimisation ou de sa commande. Dans cette optique nous utiliserons un logiciel de C.A.O industriel "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, on présente des généralités sur la construction des moteurs asynchrones et les différentes approches employées dans leur conception.

Ayant opté pour une modélisation numérique de ce type de moteur, le troisième chapitre traitera les équations mathématiques qui décrivent les phénomènes intervenant dans son fonctionnement. Il est consacré, d'une part, à un rappel des différents modèles électromagnétiques et d'autre part, à la présentation de la méthode des éléments finis.

Le quatrième et dernier chapitre, est consacré à l'application et aux résultats, il est scindé en deux parties : La première est relative aux résultats numériques de la simulation d'un moteur asynchrone de 15 kW. Ensuite, vient la validation analytique moyennant la méthode classique de LIWSCHITZ pour l'obtention des différents paramètres électromagnétiques du moteur.

Enfin on présentera 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**

Electro-Industries est une entreprise nationale qui trouve ses origines dans la restructuration de la société nationale d'électronique (SONELEC).

En raison de l'augmentation de la demande du marché ainsi que la nécessité d'accroître l'autonomie de la production nationale, SONELEC a signé une convention qui porte sur la réalisation d'un complexe industriel composé de trois unités de production à Tizi-Ouzou, dont la plus importante est matériel électronique (MEL) [3].

En 1985, MEL a été créée par une convention qui a été signée entre SONELEC et les partenaires allemands en l'occurrence :

- ✓ SIEMENS : pour les produits alternateurs, moteurs, et groupes électrogènes
- ✓ TRAFU-UNION : pour le produit transformateur
- ✓ FRITZ-WERNER pour la partie engineering du projet

Quant à la construction et l'infrastructure, elle a été confiée entreprises algériennes ECOTEC, COSIDER et BATIMETAL.

L'entrée en production et le lancement des produits ont eu lieu en janvier 1985 pour les transformateurs, et en janvier 1986 pour les moteurs/alternateur, ces produits étaient fabriqués sous la licence SIEMENS jusqu'au 1992.

Après la restructuration de la SONELEC, l'entreprise est devenue sous l'appellation ENEL (Entreprise Nationale des Industries Électrotechniques) composée de sept filiales parmi lesquelles le complexe MEL qui est considéré comme le plus important, vu l'importance de son chiffre d'affaires.

Enfin, l'électro-Industries est issue de la réorganisation du secteur industriel opérée en Algérie entre 1980 et 2000 qui a conduit en 1999 à la restructuration concrétisée par la scission de l'ancienne ENEL en un certain nombre d'EPE/SPA, parmi lesquelles figure Electro-Industries.

### **I. 3. Présentation de l'entreprise**

L'électro-industrie est une entreprise spécialisée dans la fabrication et la commercialisation des transformateurs de distribution, des moteurs électriques et les alternateurs. Son siège se situe à la daïra d'Azazga route nationale N°12 à 35 Km du chef-lieu de la wilaya de Tizi-Ouzou et à 150 Km de la capitale Alger.



**Figure I. 1 : Logo de l'entreprise Electro-Industries**



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

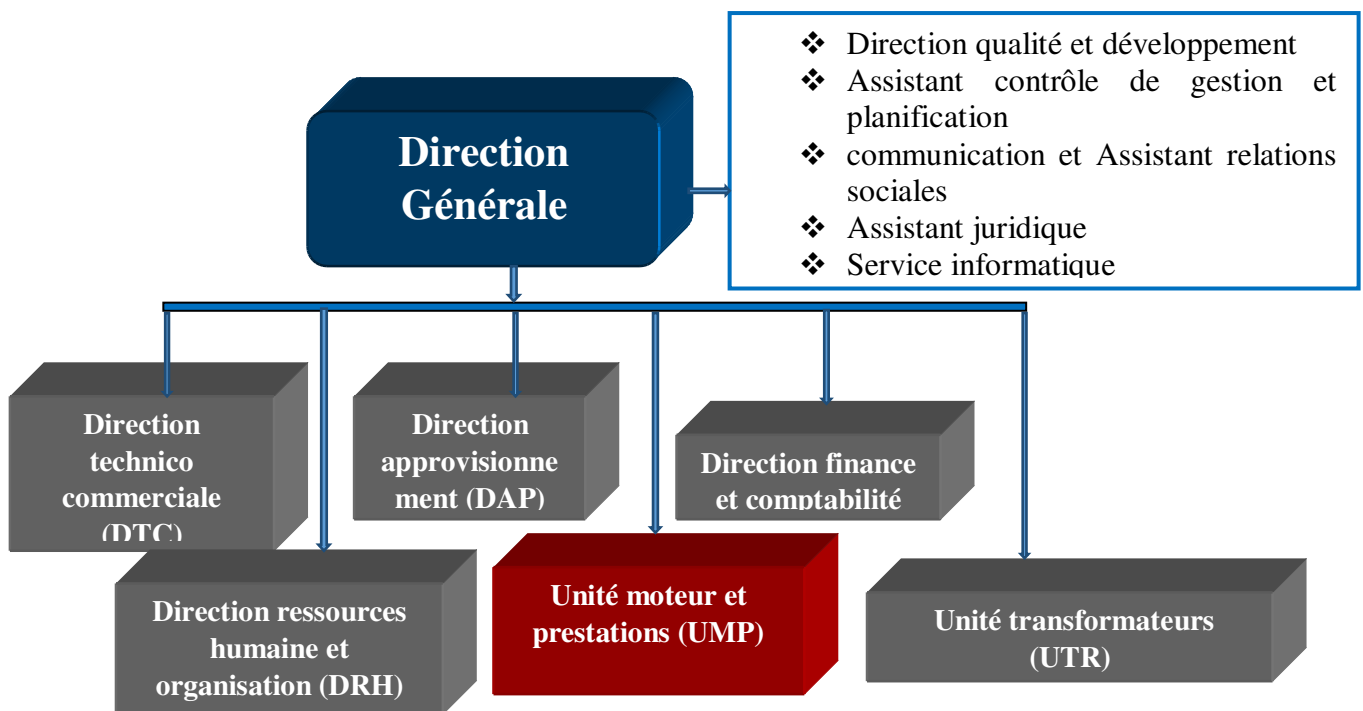
Les produits d'Electro-Industries sont réalisés et contrôlés suivant les normes DIN (degrés de protection électrique), VDE (règlement relatif aux machines), et sont conformes à la recommandation européennes CE et aux normes internes sévères préconisée par le donneur de licence Siemens. Le niveau de leurs qualité a été approuvé par la clientèle locale (SONALGAZ, ENMTP, ENIEM, KAHRIF) et étrangère (Russie, Sénégal, 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. Organigramme de l'entreprise

La direction de l'entreprise est administrée par un président directeur générale qui a pour mission d'assurer la coordination entre divers départements et la bonne gestion de l'entreprise, il prend des décisions stratégiques au point de vue organisationnelle, il est épaulé dans ses tâches par des assistants chargés du contrôle de gestion, assistant chargé des affaires juridiques contentieuses et recouvrement et un chef de département informatique.

L'entreprise Electro-Industries contient six 06 départements qui veillent à assurer le bon fonctionnement du processus de la production de l'entité et bien pour atteindre l'objectif, ils sont représentés dans l'organigramme suivant :



**Figure I. 3 :L'organigramme de l'entreprise**

Il est à signaler qu'Electro-industries est le seul fabricant de ces produits en Algérie. L'entreprise emploie un effectif de 824 travailleurs dont 17% de cadres, 33% de maîtrise et 50% d'exécution [4].

**I. 5 .Présentation de l'unité Moteurs Asynchrones et Générateurs Electriques (UMAGE)**

L'UMAGE s'occupe de la fabrication des moteurs asynchrones ainsi que les alternateurs. Elle est composée des ateliers suivants :

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

**I. 5. 1. Atelier découpage**

Dans cette atelier sont réalisés tous les travaux de transformation de tôles utilisés pour la fabrication des différents pièces, à noter :

- Découpage et encochage des tôles statoriques et rotoriques puis leurs emballage.
- fabrication des capots et roues de ventilateur.



**Figure I. 4 : Rouleaux de tôle magnétique**

**I. 5. 1. 1. Fabrication des tôles statoriques et rotoriques**

L'atelier reçoit des rouleaux de tôles magnétiques importés par Electro-industries de nature isolées au vernis

**I. 5. 1. 2. Procédés de découpage**

Le procédé le plus répandu dans cet atelier est celui de découpage automatique successif avec la presse rapide. Ce procédé permet de découper et décocher dans le même cycle les tôles statoriques et rotoriques de différents types de moteurs selon la commande lancée à la machine [5].



**Figure I. 5 : Procèdes de découpage**

Une fois découpées et encochées, les tôles statoriques et rotoriques sont évacuées vers l'extérieur de la machines par des convoyeurs et sont empilées séparément. Un autre procédé est également utilisé, il s'agit du découpage semi-automatique. Cette technique donne le même résultat.



**Figure I. 6 : Tôles statoriques et rotoriques**

### **I. 5. 1. 3. Empaquetage**

#### **I. 5. 1. 3. 1. 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 [5].



Figure I. 7 : Paquet statoriques

#### I. 5. 1. 3. 2. 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 [5]



Figure I. 8 : Paquet rotoriques

#### I. 5. 1. 4. Fabrications des capots ventilateurs :

Les capots sont réalisés à partir de tôles sous forme de disques faits en aciers. On effectue l'emboutissage par une emboutisseuse, et pour la partie plane est percée sous forme

de grille par un poinçon matrice pour permettre à l'air de circuler afin de garantir le refroidissement du moteur à travers les ailettes de carcasse.



**Figure I. 9 : Capot de ventilateur**

## **I. 5. 2. Atelier moulage sous pression**

### **I. 5. 2. 1. Injection d'aluminium pour le rotor**

C'est une opération se fait sur les moteurs à petite puissance, ce qui veut dire les moteurs à hauteur d'axe entre 70 mm et 160 mm.

Une fois l'emmanchement des arbres est fait, on introduit le rotor dans une machine, puis le procédé d'injection d'aluminium commence avec une très haute pression qui se fait à l'aide d'un piston pour permettre la pénétration de l'aluminium dans les encoches. Mais pour le grand moteur à hauteur d'axe entre 200 mm à 400 mm on utilise les barres de cuivre et les barres de bronze [5].

### **I. 5. 2. 2. Fabrication des flasques et les carcasses**

L'alliage d'aluminium fondu à haute température est injecté dans des moules conçus spécialement pour chaque pièce, l'injection s'effectue à haute pression pour former les pièces.

## **I. 5. 3. Atelier d'usinage**

Dans cet atelier se fait la fabrication des arbres ainsi que l'usinage des pièces telles que les flasques, les rotors et les carcasses :

- **Usinage 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 dans le paquet rotorique et mouler avec la cage, cependant on parle plus d'arbre mais du rotor qui est envoyé à l'atelier d'usinage pour être usiné et rectifié.



**Figure I. 10 : Arbre d'un moteur électrique après usinage**

- **Usinage de rotor**

Les opérations effectuées sur le rotor sont :

- **Tournage du paquet**

Cette opération se fait avec un tour parallèle pour avoir entrefer homogène et réduit.

- **Rectification**

Rectification des sièges de roulement et les sorties d'arbre à l'aide d'une rectifieuse.

- **Fraisage**

Fraisage de la rainure du clavette coté entraînement à l'aide d'une fraiseuse.

**Figure I. 11 : Fraisage de clavettes**

➤ **Equilibre du rotor**

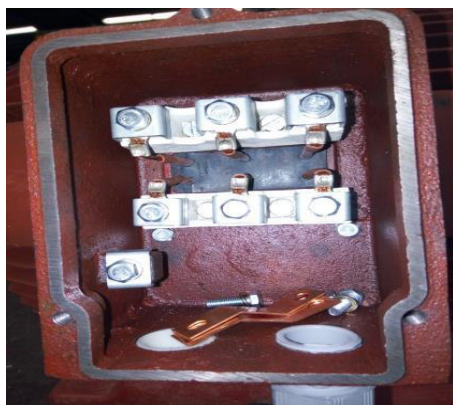
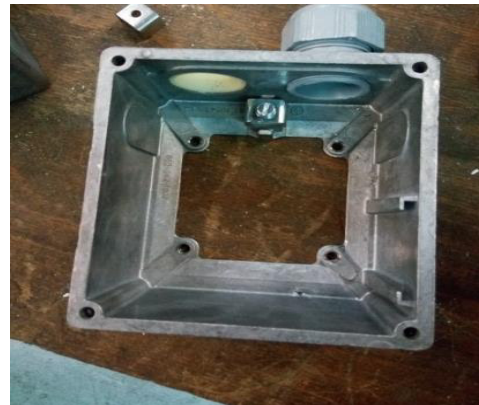
Cette opération ne se fait qu'après avoir reçu l'ordre du montage du rotor, deux méthodes d'équilibrage sont utilisées :

- Equilibrage positif avec l'ajout de rondelles d'acier.
- Equilibrage négatif avec enlèvement de matière.

**Figure I. 12 : Rotor à cage moulé****Figure I. 13 : Rotor double cage**

• **Usinage de la boîte à bornes**

Pour les boîtes à bornes on fait le perçage et le taraudage des trous de fixation recevant le couvercle à l'aide de perceuses.

**Figure I. 14 : Boîte à bornes  
En fonte usinée.****Figure I. 15 : Boîte à bornes en alliage  
D'aluminium usiné**

- **Usinage des flasques**

Il y a 03 types des flasques : Flasques AS, Flasques BS, Flasques à bride ;  
Pour la fabrication de tous les types des flasques on utilise la même presse de moulage sous pression en changeant l'empreinte du moule selon le type du flasque à fabriquer.

Pour les moteurs qui ont la hauteur d'axe entre 70 mm et 112 mm ; leurs flasques sont fabriqués par le moulage sous pression de l'alliage de l'aluminium par la presse rapide du moulage sous pression des flasques par injection de l'alliage de l'aluminium dans le moule de la presse qui contient l'empreinte du flasque [5].

Pour les moteurs qui ont la hauteur d'axe entre 160 mm et 400 mm, leurs flasques (AS, BS et à bride) sont importés brute par l'entreprise.

Ces flasques sont envoyés directement à l'atelier de l'usinage pour usiner par ébauche et finition les différentes parties fonctionnelles du flasque sur plusieurs tours (vertical, automatique, guide master...).



**Figure I. 16 : Flasque AS usiné.**



**Figure I. 17 : Flasque BS usiné.**



**Figure I. 18 : Flasque à bride usiné.**

- **Usinage des carcasses**

On fait l'alésage de la carcasse en fente à l'aide des tours verticaux pour recevoir le paquet statorique. On fait aussi le perçage et le taraudage des trous de fixation des flasques AS et BS et la boîte à bornes, à l'aide des perceuses.

**Figure I. 19 : Carcasses fonte usinée****Figure I. 20 : carcasse métal coulé  
(Aluminium)**

#### **I. 5. 4. Atelier de bobinage**

##### **I. 5. 4. 1. Secteur préparation isolation**

Lors de la fabrication des moteurs électriques, les conducteurs doivent être isolés afin de garantir le maximum de sécurité aux personnes. Pour aboutir à ce résultat, on a besoin de matériaux isolants de haute qualité, supportant les effets thermique provoqués par le fonctionnement de la machine.

Le bobinage des moteurs suit les étapes suivantes :

- Insertion des caniveaux d'encoches adéquats (la longueur des caniveaux, la classe ...).
- Introduction de la première bobine (introduire le petit faisceau, le 1<sup>ère</sup>, le 2<sup>ème</sup>, le 3<sup>ème</sup> ...), le côté gauche pour les double couche, les deux côtés pour le simple couche.
- Après chaque remplissage de l'encoche avec un faisceau on met la cale de fermeture pour la simple couche, ou bien une lame intercalaire entre les deux faisceaux d'un bobinage double couches.
- Dans le cas des petits moteurs on met les séparateur de phase au niveau des tête de bobines après la fin de l'insertion de tous les bobines dans les encoche pour isoler les 3 phases de moteurs
- Dans le cas des grands moteurs on met les séparateurs de phases entre chaque deux bobine (deux faisceaux) de deux phase différentes mais pendant l'insertion des bobines.
- A la fin, on met les gaines isolantes aux entrées et sorties de chaque bobine, on réalise la connexion interne et on met les câbles de raccordement.

**I. 5. 4. 2. Secteur préparation bobines**

Une fois le fil de cuivre contrôlé à la norme recommandée, il sera remis aux bobineurs pour confectionner les bobines voulues.

**Figure I. 21 : Bobineuse de fil électrique****Figure I. 22 : Bobineuse automatique**

La confection des bobines s'effectue à l'aide de gabarit monté sur des bobineuses qui sont réglées selon le nombre de spires par faisceaux. Une fois, l'opération terminée, elles seront retirées de la machine, attachée et envoyée aux ateliers de bobinage.

**Figure I. 23 : Préparation des bobines.****I. 5. 4. 3. Secteur préparation du stator bobiné**

Ici se déroule le processus de fabrication du stator bobiné allant de l'insertion de caniveaux d'encoches jusqu'à l'imprégnation.

**I. 5. 4. 3. 1. Insertion des caniveaux du stator bobiné**

Cette opération s'effectue à l'aide d'une machine qui découpe le papier isolant et le fait insérer automatiquement dans les encoches du stator.



**Figure I. 24 : Stator avec caniveau d'encoches isolées**



**Figure I. 25 : Insertion automatique dans les encoches d'un stator**

#### **I. 5. 4. 3. 2. Insertion des bobines dans le stator**

L'insertion des bobines se fait automatiquement ou d'une façon manuelle, pour le moteur d'hauteur d'axe allons de 70 mm à 112 mm. Pour les moteurs à hauteur d'axe allant de 130 mm à 400 mm l'insertion est exclusivement manuelle.



**Figure I. 26 : Stator bobiné isolé**

Remarque :

Pour le bobinage double couche, c'est pendant cette opération que l'on intègre les lames intermédiaires ainsi que les cales de fermeture.

Une fois les bobines logées, on place les séparateurs de phases afin d'éviter le court-circuit entre phases, et on procède au formage de tête de bobine manuellement à l'aide d'un mandrin et d'un marteau en bois (maillet) afin de respecter l'homogénéité et dimensions des têtes de bobines cotes AS et BS.

**AS** : coté entraînement

**BS** : coté de ventilation

**I. 5. 5. Atelier montage****I. 5. 5. 1. Le montage**

Le montage, des moteurs asynchrones se fait en deux parties :

- La première est l'emmanchement du paquet statorique dans la carcasse à l'aide d'une presse, on effectue par la suite le perçage de l'ensemble (carcasse-stator) pour renforcer la liaison entre la carcasse et le stator à l'aide d'une goupille.
- La deuxième, consiste à :
  - L'emmanchement des roulements coté AS et BS ;
  - L'intégration du rotor dans (le stator-carcasse) ;
  - L'emmanchement du flasque palier et ventilateur cote BS ;
  - Fixation du capot, coté BS ;
  - Fixation du flasque palier ou la bride selon la commande du client ;
  - Fixation des câbles de raccordement sur la plaque à borne.



**Figure I. 27 : Pré montage du stator dans la carcasse.**



**Figure I. 28 : stator bobiné monté dans une carcasse**

**I. 5. 5. 2. Contrôle final des moteurs :**

Après avoir fini de les monter, les moteurs sont envoyés à l'atelier de contrôle avec une fiche de suivi pour chaque moteur. Le contrôle final s'effectue en plusieurs en plusieurs étapes :

**I. 5. 5. 2. 1. Le contrôle visuel**

Il consiste à vérifier le bon serrage des vis ou des boulons, en suite vérifier les connexions sur la boîte a borne

**I. 5. 5. 2. 2. Les contrôles électriques :**

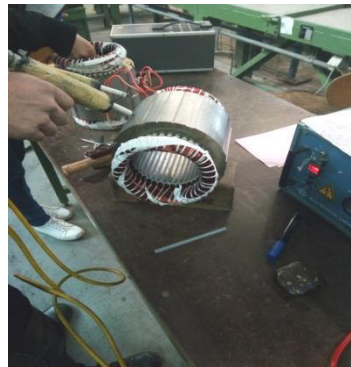
Chaque fois qu'une série de moteur est fabriquée, on prend un moteur au hasard on l'appel - échantillon – et on lui fait subir une série d'essais :

- Mesure des résistances de l'enroulement ;
- Mesure des résistances entre phases
- On vérifie aussi le sens de rotation si l'arbre tourne de gauche à droite

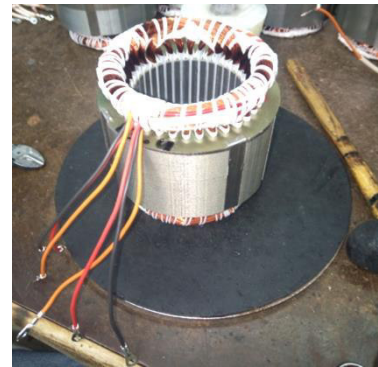
Si les mesures qui ont été faites correspondent à celles qui ont été fournies par le bureau d'étude on passe aux essais conventionnels.



**Figure I. 29 : Contrôle de polarité.**



**Figure I. 30 : Contrôle d'isolation.**



**Figure I. 31 : Stator après Le frettage et contrôle**

- Essai en court-circuit :

Le contrôleur applique une tension et l'augmente jusqu'au l'obtention un courant nominal en maintenant le rotor bloqué, puis on mesure à l'aide d'un voltmètre et un wattmètre la puissance du court-circuit et la tension du court-circuit.

- Essai à vide : Le contrôleur applique une tension nominal il mesure le courant à vide et la puissance à vide.
- Essai spécial : Les moyens utilisés pour effectue cet essai sont :
  - ✓ Corde et poids et la poulie pour les petites puissances
  - ✓ Dynamo-frein pour les grands moteurs de puissances

Pour effectuer cet essai le contrôleur fait charger le moteur à sa puissance nominale et relève chaque 15 minutes les grandeurs suivantes :

- La température de moteur.
- Le courant absorbé.
- La vitesse de rotation du moteur.
- Le couple utile
- Le facteur de puissance.
- Le rendement.

Le but de ce essai est juger la bonne tenue de la classe d'isolation du moteur et la détermination de la température limite à force puissance nominale, à la fin de cet essai le contrôleur relève la résistance chaude.

### **I. 6. Service après-vente**

Une structure après-vente dotée d'une longue expérience est à l'écoute permanente des préoccupations des clients.

Elle est constituée d'éléments expérimentés même de prendre toutes les dispositions en matière et pièces de rechanges. Pendant la période de garantie (12 mois), toutes opérations d'entretien ou de réparation sont assurées par Electro-industries.

Au-delà de la période de garantie l'entreprise offre la possibilité d'assister ses clients par le conseil, la prise en charge de la réparation ou la fourniture des pièces de rechange de sa fabrication.

### **I. 7. 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

La conception des machines électriques est en pleine évolution. En effet, l'intensification de la concurrence économique force les entreprises à accélérer le renouvellement de leurs produits et la mise en œuvre de technologies innovantes. Les ingénieurs et chercheurs se trouvent confrontés à ce nouveau défi qui consiste à faire face à une complexité croissante dans des délais d'études toujours plus courts [6].

Ainsi, le domaine de construction des machines électriques est l'une des plus prestigieuses découverte et demeure aujourd'hui un thème de recherche très prisé par les laboratoires de recherche. L'objectif visé portant sur l'éco-dimensionnement est posé comme suit : Comment déterminer les caractéristiques physiques des machines électriques qui optimisent le compromis coût-volume-performances» [2].

Dans ce chapitre nous allons présenter les différentes notions relatives à la construction des machines électriques, et nous nous sommes intéressés plus particulièrement à celles des machines asynchrones, objet de notre étude.

### II. 2. Construction du moteur asynchrone triphasé

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. [2]

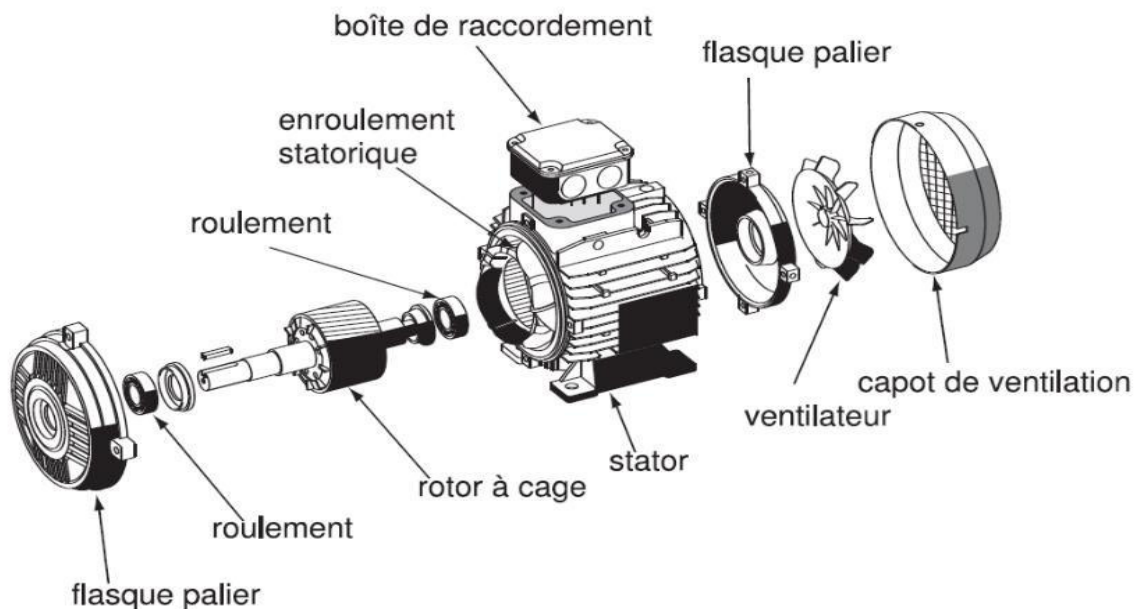
L'une des composantes, appelée le *stator*, est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source, l'autre composante, nommée le *rotor*, est montée sur un axe et libre de tourner.

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 [2].

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 [7].

## Chapitre II Généralités sur la construction de la machine asynchrone

Depuis quelques années, le moteur à bagues a été délaissé au profit du moteur à cage piloté par des convertisseurs à fréquence variable [8].



**Figure II. 1 : Vue éclatée du moteur asynchrone**

### **II. 2. 1. Le Stator**

Le Stator (aussi appelé « l'inducteur ») de la machine asynchrone est constitué de tôles d'acier ou de silicium dont l'épaisseur varie entre 0,35 et 0,50 mm dans lesquelles sont placés les bobinages statoriques [9].

Ces tôles sont, pour les petites machines, découpées en une seule pièce alors qu'elles sont, pour les machines de puissance plus importantes, découpées par sections. Elles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Au final, elles sont assemblées les unes aux autres à l'aide de boulons ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique [9].

Le stator d'une machine asynchrone est aussi pourvu d'une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique. Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique tournant à la pulsation de synchronisme (vitesse de synchronisme) [10].



**Figure II. 2 : Stator**

### **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 [2].

Le rotor n'est relié à aucune alimentation, il tourne à la vitesse de rotation  $\Omega$ . Il est monté sur l'arbre moteur et se compose d'un cylindre fait des tôles empilées. Des encoches sont percées à la périphérie extérieure destinées à recevoir des conducteurs.

Il est séparé du stator par un entrefer très court de l'ordre de 0.2 à 2 mm seulement. Sachant que ce dernier tourne à une vitesse  $N_n$  qui est inférieur à la vitesse de synchronisme (celle du stator  $N_s$ ). Il se compose essentiellement [1].

- D'un empilage de disques minces isolés entre eux et clavetés sur l'arbre du rotor afin de canaliser et de faciliter le passage du flux magnétique.
- D'une cage d'écureuil en aluminium coulé dont les barreaux sont de forme trapézoïdale pour les moteurs asynchrones standards et fermés latéralement par deux "flasques" conductrices

Dans le cas d'un rotor à cage les enroulements sont constitués de barres de cuivre pour les gros moteurs ou d'aluminium pour les petits. Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux dit "de court-circuit", eux aussi fabriqués en cuivre ou en aluminium [11].

## **Chapitre II Généralités sur la construction de la machine asynchrone**

Le rotor de la machine asynchrone est aussi pourvu d'ailettes de ventilation pour permettre un refroidissement de la cage le plus efficace possible. Il existe différents types de rotor à cage. Ces derniers dépendent principalement de la taille du moteur et de l'application qu'il en sera fait [6].



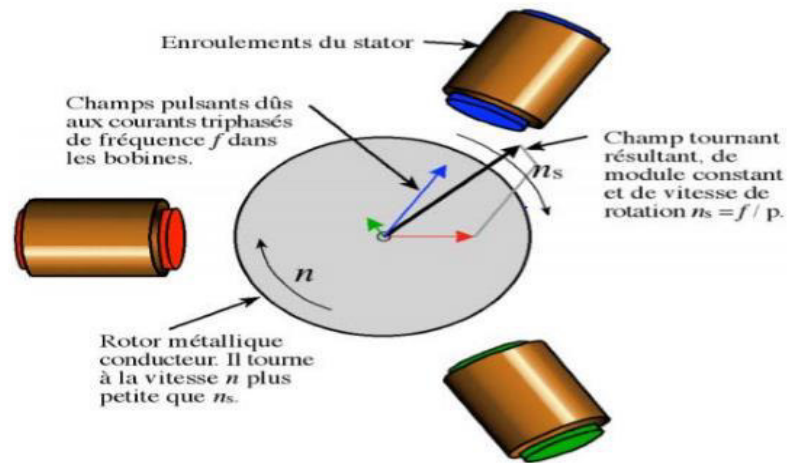
**Figure II. 3 : Rotor a cage d'écureuil**

### **II. 3. Principe de fonctionnement**

Le principe des moteurs à courants alternatifs réside dans l'utilisation d'un champ magnétique tournant produit par des tensions alternatives

Le stator supporte trois enroulements décalés de  $120^\circ$  l'une de l'autre. Ces trois bobines alimentées par trois tensions décalées à  $120^\circ$  électrique, issues donc d'un système triphasé produisent un champ magnétique tournant (champ inducteur), le rotor se trouvant au centre de ce champ. Tant que le rotor a une fréquence de rotation différente que celle du champ inducteur, chaque point de rotor « voit » une variation de champ [10].

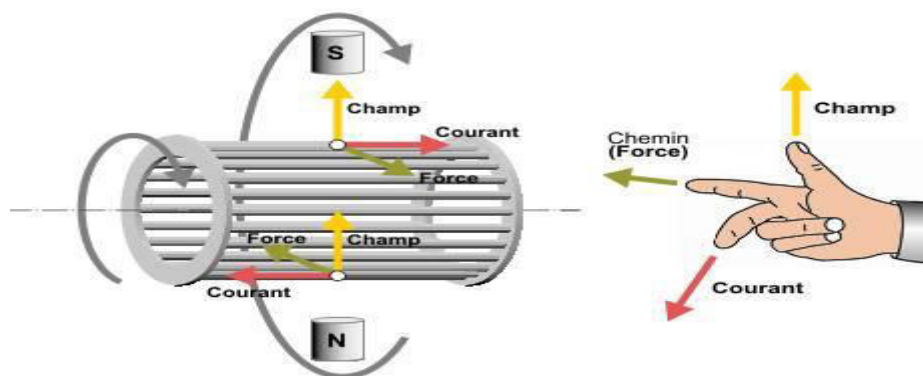
Les conducteurs rotoriques produisent donc une f.é.m., qui, dans le circuit fermé va donner naissance à des courants induits. Ces courants vont leur tour produire un champ magnétique induit qui va s'opposer à la cause qui lui a donné naissance. Cela se traduit concrètement par un phénomène de poursuite du rotor vis-à-vis du champ tournant sans qu'il n'arrive jamais à le rattraper [12].



**Figure II. 4 : Interactions rotor stator**

D'une part sur la création d'un courant électrique induit dans un conducteur placé dans un champ magnétique tournant. Le conducteur en question est un des barreaux de la cage d'écureuil ci-dessous constituant le rotor du moteur [1].

L'induction du courant ne peut se faire que si le conducteur est en court-circuit (c'est le cas puisque les deux bagues latérales relient tous les barreaux). D'autre part, sur la création d'une force motrice sur le conducteur considéré (parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique tournant ou variable) dont le sens est donné par la règle des trois doigts de la main droite [11].



**Figure II. 5 : Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone**

Comme montré sur le schéma ci-dessus, le champ tournant, à un instant donné, est orienté vers le haut. En considérant deux conducteurs diamétralement opposés, on constate que les courants induits dans ces deux conducteurs sont en sens inverse et, associés au champ magnétique, créent des forces motrices en sens inverse [3].

## **Chapitre II Généralités sur la construction de la machine asynchrone**

Le rotor étant libre de tourner sur l'axe X-Y, les deux forces s'associent pour imprimer aux deux conducteurs un couple permettant la rotation de la cage d'écurieuil : le moteur électrique est inventé.

Pour entretenir la rotation du moteur, il est nécessaire de faire varier soit le courant dans les conducteurs de la cage, soit le champ magnétique. Dans un moteur asynchrone, c'est le champ magnétique qui varie sous forme de champ tournant créé dans le stator [11].

Au démarrage le champ tournant balaye les conducteurs de son flux à la vitesse angulaire de synchronisme. Le rotor mis en rotation tend à rattraper le champ tournant. Pour qu'il y ait un couple entretenu au niveau des conducteurs, la variation de flux doit être présente en permanence ; ce qui signifie que si les conducteurs tournent à la vitesse de synchronisme comme le champ tournant, la variation de flux sur les conducteurs devient nulle et le couple moteur disparaît [10].

Un rotor de moteur asynchrone ne tourne donc jamais à la vitesse de synchronisme (50 Hz). Pour un moteur à une paire de pôles (à 50 Hz, la vitesse de rotation du champ tournant est de 3 000 [tr/min]) la vitesse de rotation du rotor peut être de 2 950 [tr/min] par exemple ; intervient ici la notion de glissement.

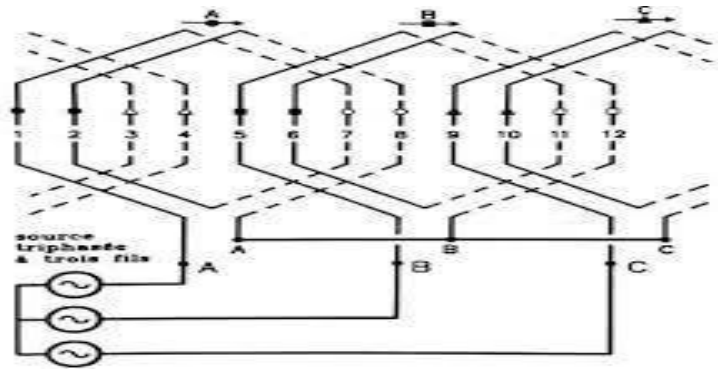
### **II. 4. Bobinage**

Trois types de bobinage de stator sont habituellement utilisés : l'imbriqué, le concentrique et l'ondulé, chacun d'entre eux présentant ses propres avantages.

Dans les petits moteurs asynchrones on emploie généralement l'enroulement concentrique, surtout quand le bobinage est mécanisé. L'enroulement ondulé est appliqué pour les moteurs à bagues. Les enroulements imbriqués et ondulés sont le plus souvent à double couche, de manière que chaque encoche contient deux côtés de bobine et le nombre de conducteurs par encoche doit forcément être pair [13].

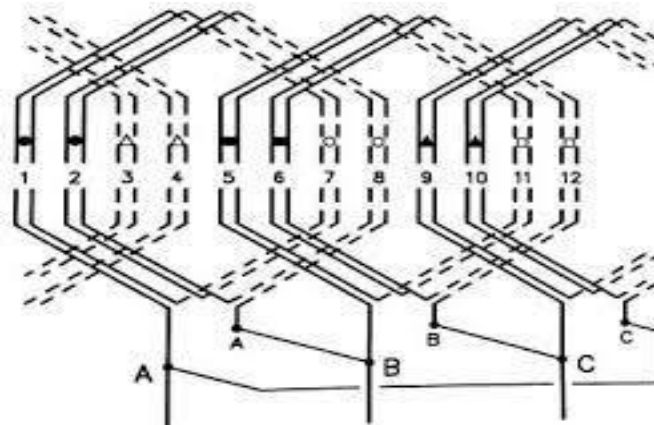
#### **II. 4. 1. Bobinage imbriqué**

Dans ce type de bobinage, chaque bobine qui forme l'enroulement occupe deux encoches. Alors le nombre d'encoches doit être multiple de deux fois le nombre de phases. Le nombre d'enroulements par phase est égal au nombre de paires de pôles [14].



**Figure II. 6 : Enroulement imbriqué à une couche, une paire de pôles, 12 encoches**

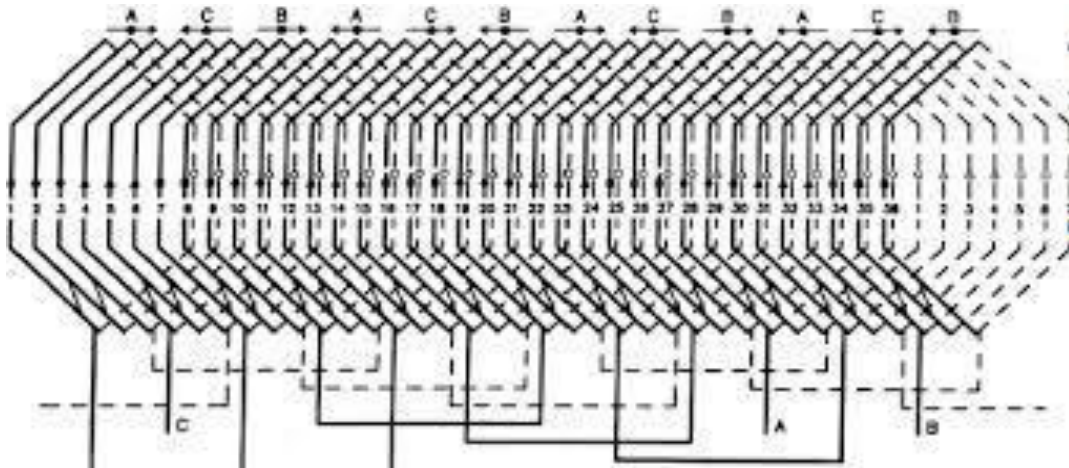
En réalité, chaque bobine qui occupe une paire d’encoches se compose de plusieurs conducteurs ou tours de fil. Ces schémas sont des modèles simplifiés avec un seul tour de fil par bobine. Le nombre de tours de fil est déterminé en fonction de la tension d’alimentation et les Ampères-tours nécessaires pour produire le flux souhaité dans le circuit magnétique. La figure suivante représente deux tours de fil par bobine en plus de la connexion en triangle (les précédentes étant en étoile) [7].



**Figure II. 7 : Enroulement imbriqué mais pour deux tours de fil et connexion en triangle.**

#### **II. 4. 2. Bobinage imbriqué à double couche**

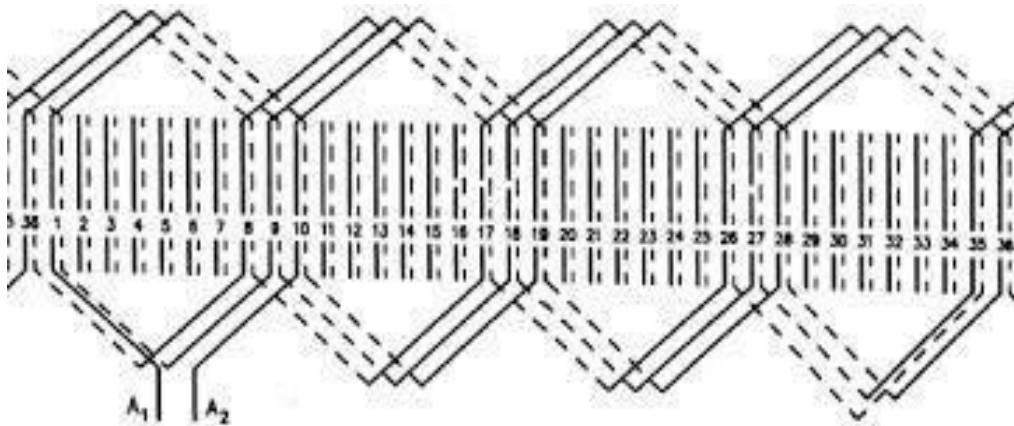
L’enroulement imbriqué est le plus utilisé pour les stators des moteurs à grande puissance. Le plus souvent un enroulement à double couche est employé, de manière que chaque bobine est composée de la moitié des conducteurs qui passent par une encoche, et les conducteurs sont placés dans l’encoche de manière qu’une bobine occupe la partie supérieure et l’autre la partie inférieure [7].



**Figure II. 8 : Enroulement imbriqué double couche. Moteur 3 phases, 4 pôles, 36 encoches**

**II. 4. 3. Bobinage ondulé**

Comme le bobinage imbriqué, il s’agit d’un type d’enroulement habituellement fait à double couche. Dans ce type d’enroulement, les conducteurs qui occupent les encoches sous deux pôles consécutifs sont connectés en série. Le circuit fait le tour du stator une ou plusieurs fois, sans revenir en arrière, en allant d’un pôle à l’autre. On nomme tronçon le circuit formé lorsque toutes les encoches d’une même phase contiennent un conducteur. Comme il s’agit d’un circuit à double couche, il est possible de superposer un deuxième tronçon au premier, mais ceci doit se faire en sens inverse [7].



**Figure II. 9 : Enroulement ondulé d’une phase. Moteur à 4 pôles et 36 encoches**

La figure précédente montre deux tronçons qui forment une phase complète. Les lignes complètes représentent les conducteurs supérieurs et les lignes pointillées représentent les conducteurs inférieurs. Le nombre de tronçons est deux fois le nombre de phases. Dans un tronçon, un conducteur supérieur est connecté à un conducteur inférieur et vice-versa.

## Chapitre II Généralités sur la construction de la machine asynchrone

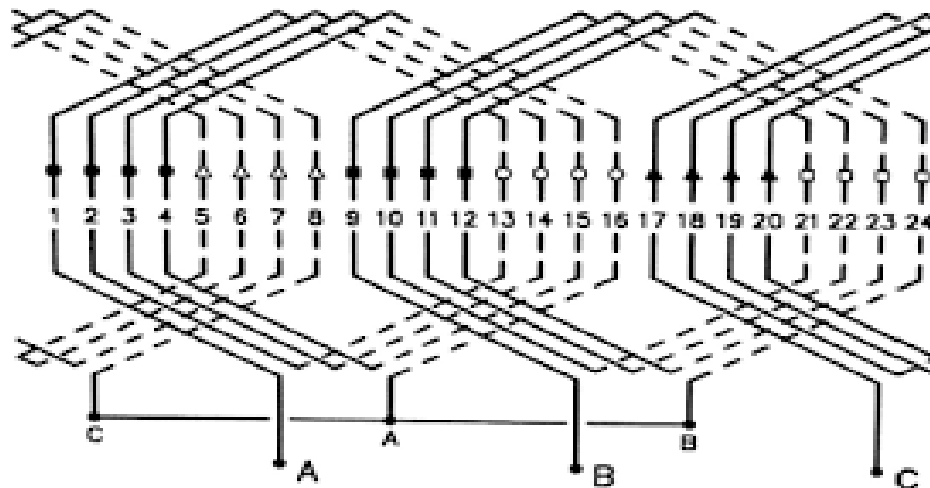
Entre le début et la fin de chaque tronçon il y a un nombre de pas raccourcis égal au nombre d'encoches par pôle par phase moins un. Pour le bobinage des autres phases, le même principe s'applique avec un décalage de  $120^\circ$  électriques

### II. 4. 4. Bobinage concentrique

C'est le type de bobinage à simple couche le plus connu, chaque bobine occupe et remplit deux encoches. La différence réside dans le fait que, pour une phase, les bobines sont de dimensions différentes et placées les unes autour des autres.

Pour un moteur à une paire de pôles et douze encoches, plutôt que 1 et 7 pour la première bobine et 2 et 8 pour la seconde, la première bobine est agrandie et occupe les encoches 1 et 8, alors que la seconde est réduite et occupe les encoches 2 et 7 [7].

Aucune des deux n'est à pas normal (6), au contraire que dans le bobinage imbriqué, car l'une est à pas 5 et l'autre à pas 7. Cependant, la moyenne correspond au pas normal. Considérant un moteur à une paire de pôles et 24 encoches, les bobines pour la phase occupent l'encoche 1 et 16, 2 et 15. Le même raisonnement s'applique aux autres phases. Ce type d'enroulement est à simple couche [7].



**Figure II. 10 : Enroulement concentrique. Moteur à une paire de pôles et 24 encoches**

### II. 5. 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 [15].

1. Des matériaux magnétiques pour canaliser le flux magnétique ;

## **Chapitre II Généralités sur la construction de la machine asynchrone**

2. Des matériaux conducteurs pour conduire les courants électriques ;
3. Des isolants ;
4. 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 [12]

### **II. 5. 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 :  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M}$  (II.1)

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

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

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

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

## Chapitre II Généralités sur la construction de la machine asynchrone

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

**Tableau II. 1 : Caractéristiques de Quelques Matériaux Magnétiques Doux (à température ambiante)**

- Par contre, un matériau magnétique dur est caractérisé par une perméabilité relative faible ( $\mu_r \approx 1$ ) et un champ coercitif élevé [10].

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	Champ
		rémanente (T)	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)**

## **Chapitre II Généralités sur la construction de la machine asynchrone**

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 [16].

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 [16].

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. 5. 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 [9].

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 [2], [17].

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.

$$\rho(T) = \rho_0(t + \alpha\Delta T) \quad (\text{II.1})$$

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 en ohm-mètre,  $\Omega \cdot m$**

### II. 5. 3. Matériaux Isolants- Classe d'isolation

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 [10].

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 [10].

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 [17].

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 [17].

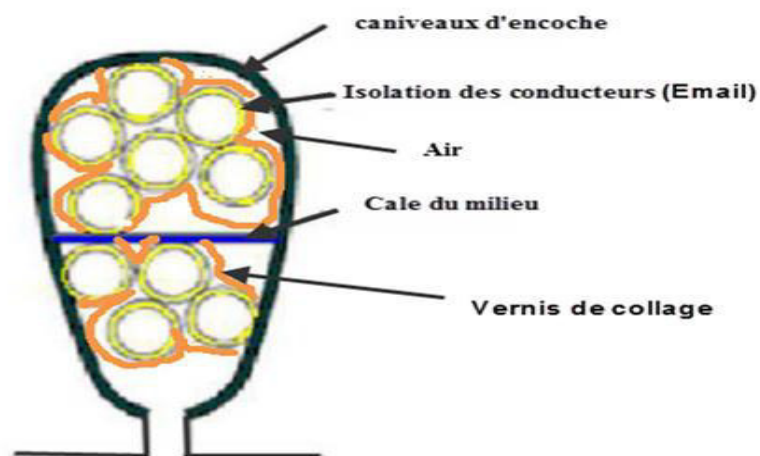
L'isolation entre les conducteurs, les bobines entre elles et le circuit magnétique peut s'effectuer à l'aide de plusieurs types de matériaux isolants, tels que le coton, la soie, le papier et autre matériaux similaires parfois imprégnés d'huile [10].

## Chapitre II Généralités sur la construction de la machine asynchrone

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 [10].

Pour l'isolation des fils on utilise des vernis. La (figure I.11) présente les différentes isolations existantes dans une encoche.



**Figure. II. 11 : Différentes isolations dans l'encoche [13]**

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 [12].

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) suivant [15] [9].

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

## **Chapitre II Généralités sur la construction de la machine asynchrone**

conducteur et masse, on utilise les cartons, toiles huilées et tissus des verres imprégnés de vernis de silicone.

D'après la Commission électrotechnique internationale :

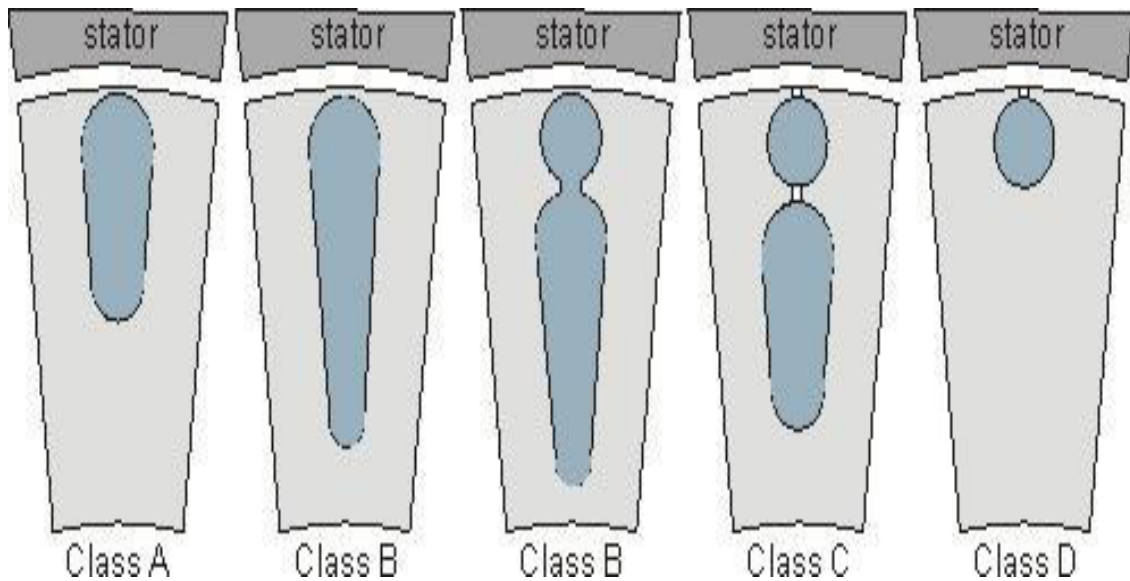
<b>Classe</b>	<b>T° max (°C)</b>	<b>Matériaux</b>
<b>Y</b>	90	Coton, soie, papier et matière organique similaire sans imprégnation, ni immersion dans un diélectrique liquide
<b>A</b>	105	Les même matières mais imprégnées et immergées dans un diélectrique liquide tel que l'huile
<b>E</b>	120	Emaux au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

**Tableau II. 4 : Classification des Matériaux d'Isolants**

### **II. 6. Classification des moteurs à cage d'écureuil**

Selon le critère de la NEMA ([www.nema.org](http://www.nema.org)), on peut classier 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. 12 : 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

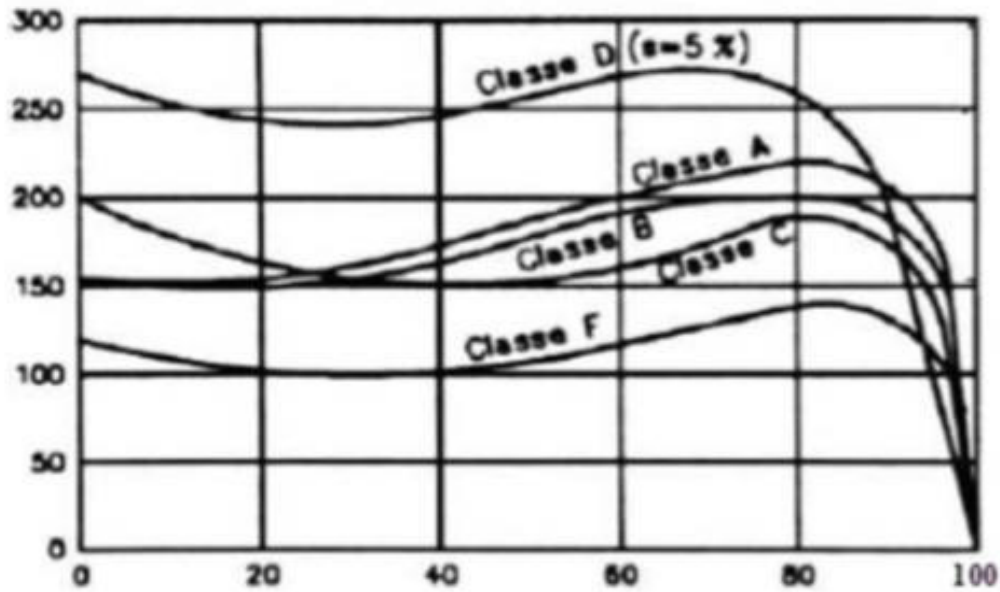
**Classe C** : Moteurs à fort couple et à faible courant de démarrage

**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 [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 et meilleur est le couple de démarrage, jusqu'à une certaine limite, bien entendu [1].



**Figure II. 13 : Courbes couple/vitesse en fonction de la classe du moteur**

### **II. 6. 1. La différence entre ces 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 [2].

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 [2].

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 effet, lors du démarrage, le conducteur éloigné de l'entrefer a une grande résistance ce qui force le courant à passer dans le conducteur extérieur à faible résistance et donc à fort couple [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 [2].

Les moteurs de classe D se caractérisent par un enroulement d'une grande résistance en raison de sa faible section, ce qui leur confère un fort couple de démarrage ainsi qu'un faible

## **Chapitre II Généralités sur la construction de la machine asynchrone**

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 [2].

### **II. 7. 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 [6].

Les caractéristiques statiques et dynamiques sont calculées d'après les schémas équivalents de la machine. Par la suite nous vous proposons une liste de quatre méthodes de calcul non exhaustives rencontrées dans notre recherche bibliographique

#### **II. 7. 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 [6].

#### **II. 7. 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 quelquefois

## **Chapitre II Généralités sur la construction de la machine asynchrone**

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 [6].

### **II. 7. 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 [6].

### **II. 7. 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 [6].

## **II. 8. Conclusion**

Dans ce chapitre, après la présentation de la constitution générale d'une machine asynchrone, son principe de fonctionnement et ses caractéristiques, commencent par la constitution et la définition des problèmes de la conception en passant par les phénomènes électromagnétique qui régissent la machine asynchrone tout en détaillant la structure de ces principaux composants à savoir le rotor et le stator.

Ensuite, on a également vu le rôle des matériaux entrant dans la fabrication des machines électriques et leurs importances comme éléments nécessaires dans l'amélioration de fonctionnement de cette dernières.

# *Chapitre III*

## *Modélisation numérique des moteurs asynchrones*

### III. 1. Introduction

L'analyse des performances des moteurs asynchrones est effectuée avec un modèle de simulation, détaillé (simulation électromagnétique, mécanique etc...). En ce qui concerne les phénomènes électromagnétiques, James Clark Maxwell les a regroupé, dans quatre équations, en les associant aux équations dites de milieu, cela permet de modéliser la majorité des systèmes électromagnétiques [13].

La simulation électromagnétique fait appel au calcul des champs créés dans les diverses parties du moteur. Les grandeurs à l'intérieur de ce dernier sont de nature essentiellement bidimensionnelle dans un plan perpendiculaire à l'axe de la machine [18].

Tous les modèles obtenus sont à équations aux dérivées partielles dont la résolution analytique n'est pas souvent évidente, aussi pour s'affranchir de cette difficulté des méthodes numériques ont été développées [18].

Dans ce chapitre, nous rappelons les principaux modèles magnétodynamiques. Nous évoquons de façon plus détaillée la formulation basée sur le potentiel vecteur magnétique car c'est cette dernière qui est implémentée dans le logiciel Ansys-Maxwell pour la simulation transitoire en hypothèse 2D de notre moteur asynchrone.

### III. 2. Mise en équation

#### III. 2. 1. Equations de base

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

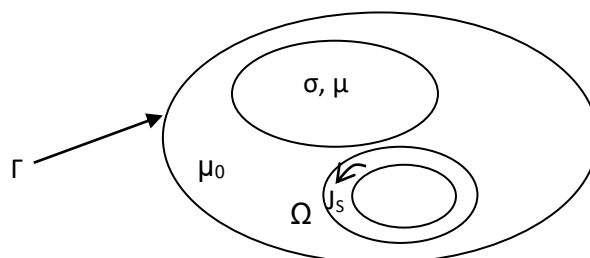


Figure III. 1 : Domaine d'étude

L'ensemble des phénomènes électromagnétiques est régi par les équations de Maxwell. Celles-ci constituent un système d'équations aux dérivées partielles qui lient les phénomènes magnétiques aux phénomènes électriques [19].

- **Maxwell-Gauss:**

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

- **Maxwell-Faraday:**

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

- **Conservation du flux**

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

- **Maxwell-Ampère:**

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

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

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

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

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

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

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

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

Ce qui induit la conservation de la densité de courant :

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

### III. 3. Formulation magnétodynamique

#### III. 3. 1. Introduction des potentiels

La résolution des équations de Maxwell peut être obtenue en considérant les champs comme inconnues. Cependant, on préfère souvent exprimer les champs électrique et magnétique en fonction de potentiels. En effet, M. Feliachi a montré que le système obtenu en prenant comme inconnues les champs  $(\vec{E}, \vec{H})$  converge moins bien que si on travaille avec des potentiels [2].

Les potentiels électromagnétiques peuvent être introduits lorsque le rotationnel ou la divergence d'un champ électromagnétique est nul. Ainsi en électrostatique, le rotationnel nul du champ électrique ( $\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = 0$ ) introduit un champ de gradient :  $\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}V}$  où V est le potentiel scalaire électrique défini à une constante près. En magnétodynamique, la divergence du champ magnétique ( $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$ ), introduit elle un champ rotationnel :  $\vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A}$  où  $\vec{A}$  est le potentiel vecteur magnétique [2].

Différentes formulations électromagnétiques ont été élaborées dans la littérature, en exprimant les champs de vecteurs  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$  et  $\vec{J}$  en fonction de nouvelles variables, telles que les potentiels vecteurs magnétique  $\vec{A}$  et électrique  $\vec{T}$  ou des potentiels scalaires électrique V et magnétiques et réduits  $\Phi_r$ , d'autres formulations sont obtenues exprimant sous d'autres formes les équations de Maxwell, et dont la résolution conduit aux diverses grandeurs locales ou globales du problème [20].

#### III. 3. 2. Formulation en champ électrique $\vec{E}$

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

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

Elle nécessite l'utilisation des éléments d'arêtes pour prendre en compte les conditions aux limites (de façon naturelle) et les discontinuités sur les composantes normales aux interfaces des champs de vecteur [20].

#### III. 3. 3. Formulation en champ magnétique $\vec{H}$

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

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

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

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

Cette relation implique la discontinuité de la composante normale de  $\vec{H}$  dans le cas de discontinuité de  $\mu$ . Ceci rend la formulation beaucoup moins intéressante dans le cas des éléments finis nodaux. En revanche, elle est bien adaptée aux éléments d'arêtes puisque la continuité de la composante tangentielle de H est vérifiée [20].

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

Ce modèle de formulation utilise le potentiel vecteur magnétique  $\vec{A}$  dans tout le domaine incluant les régions conductrices et non conductrices et le potentiel scalaire électrique uniquement dans les régions conductrices [20].

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- **Au niveau feuille statoriques**

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

- **Au niveau d'encoches statoriques**

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

- **Au niveau d'entrefer**

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

- **Au niveau feuille rotoriques**

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

- **Au niveau des barres rotoriques**

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

### III. 5. Méthodes numériques

Les formulations magnétodynamiques précédemment exposées sont des équations aux dérivées partielles sous forme continue. Elles peuvent être résolues par l'une des méthodes numériques suivantes :

La méthode des différences finies (FDM), la méthode des éléments de frontière (BEM), la méthode des intégrales de volume, la méthode des volumes finis (FVM) et la méthode des éléments finis (MEF) [19].

#### III. 5. 1. La méthode des différences finies

Historiquement la première, elle consiste à discrétiser le domaine étudié par un réseau de points à mailles rectangulaires et à remplacer les opérateurs différentiels par des opérateurs de différences entre les valeurs de l'inconnue en différents points voisins. Si cette méthode est simple à programmer, elle nécessite un maillage régulier qui s'adapte mal aux géométries complexes [12].

#### III. 5. 2. La méthode des éléments finis

Elle est basée sur la transformation des équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques. Elle est bien utilisée lorsque l'excitation s'effectue à basse ou moyenne fréquence.

Nous ne nous intéressons qu'à la méthode des éléments finis malgré son coût en occupation mémoire et en temps d'exécution, cette méthode présente des avantages tels que la robustesse ou la précision [12].

### III. 5. 2. 1. Approximation par la MEF

La méthode des éléments fins a largement été présentée dans la littérature scientifique. Elle consiste en une double discrétisation : une discrétisation spatiale (maillage du domaine) et une discrétisation des champs. La discrétisation spatiale permet de définir les fonctions de base (scalaires ou vectorielles) donnant naissance aux sous-espaces d'approximation des espaces continus (espaces dans lesquels se trouvent les champs). La discrétisation des champs consiste en la discrétisation de l'équation différentielle et des conditions aux limites pour obtenir un système algébrique où la vectrice solution de ce système contient les valeurs approximatives des champs sur les points du maillage [21].

De façon générale, les problèmes de magnétodynamique formulés sur un domaine de frontière peuvent s'exprimer sous la forme suivante :

$$L(u) = f \quad \text{Dans } \Omega \quad (\text{III.24})$$

$$M(u) = g \quad \text{Sur } \Gamma \quad (\text{III.25})$$

Où L et M sont des opérateurs différentiels, f et g des fonctions connues et u la variable (inconnue) recherchée.

### III. 5. 2. 2. Etapes de résolution par la MEF

D'une façon générale, la résolution par la MEF inclut les étapes suivantes :

- Obtention de la formulation variationnelle du problème et définition des espaces fonctionnels de solutions admissibles.
- Réalisation d'un maillage, correspondant à la discrétisation du domaine d'étude en éléments (triangles, tétraèdres, hexaèdres...) sur lesquels les champs sont écrits en termes d'un nombre fini de degrés de liberté et de fonctions de base à support local
- Calcul des matrices élémentaires qui, après assemblage, génèrent un système matriciel creux.
- Résolution du système algébrique pour l'obtention d'une solution approchée du problème.

**III. 5. 2. 3. Méthode des résidus pondérés****III. 5. 2. 3. 1. Principe de la méthode**

La méthode des résidus pondérés est donnée par la formule suivante :

$$R = L(A) - f_v \quad (\text{III.26})$$

A l'aide de fonctions de pondération bien choisies, on impose à l'intégrale du 3

Résidu de s'annuler en n points du domaine  $\Omega$  :

$$\int_{\Omega} R_i \cdot \phi_i \cdot d\Omega = 0 \quad (\text{III.27})$$

Les valeurs de A qui permettent d'annuler l'intégrale, sont solution du système algébrique obtenu.

**III. 5. 2. 3. 2. Différentes méthodes déduites des résidus pondérés**

Le choix des fonctions de pondération appelées aussi fonctions de projection, conduit à plusieurs méthodes. Parmi celles-ci nous citerons :

- La méthode de collocation par point.
- La méthode des moindres carrés.
- La méthode de Galerkinge.

La méthode de collocation par point utilise les fonctions de Dirac comme fonction de pondération, la méthode des moindres carrés est basée sur la minimisation de la norme quadratique de l'erreur sur l'équation et les conditions aux limites. La méthode de Galerkinge consiste à choisir des fonctions de projection identiques aux fonctions d'approximation [20].

Contrairement à la méthode variationnelle. La méthode des résidus pondérés ne nécessite pas la connaissance au préalable, de la fonctionnelle d'énergie du système.

Dans le cas de l'utilisation de la méthode de Galerkinge, on obtient un système algébrique symétrique facile à résoudre

On se limitera dans ce qui suit, à la méthode projective de Galerkinge qui est utilisée dans le cadre de ce travail.

**III. 5. 2. 3. 3. La discrétisation**

L'approche de base de la méthode des éléments finis est de subdiviser le domaine d'étude en un nombre finis de sous domaines appelés éléments. L'approximation de l'inconnue se fait en chaque élément à l'aide des fonctions d'interpolation. La fonction

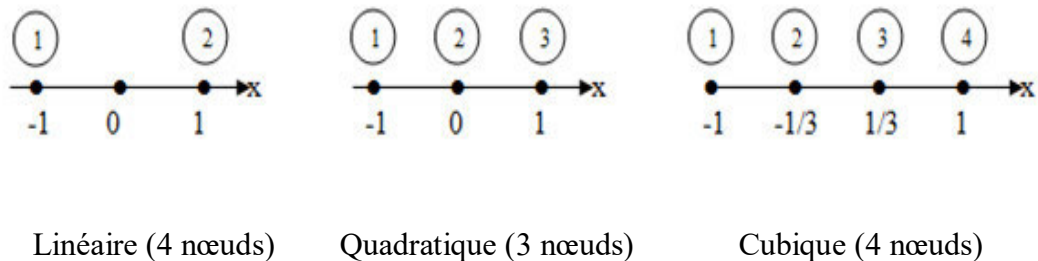
d'interpolation est aussi définie en fonction de la géométrie de l'élément qu'on choisit préalablement et coïncide avec les nœuds de cet élément relatifs aux valeurs de l'inconnue. On parle alors d'interpolation nodale [19].

➤ **Éléments finis réels**

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

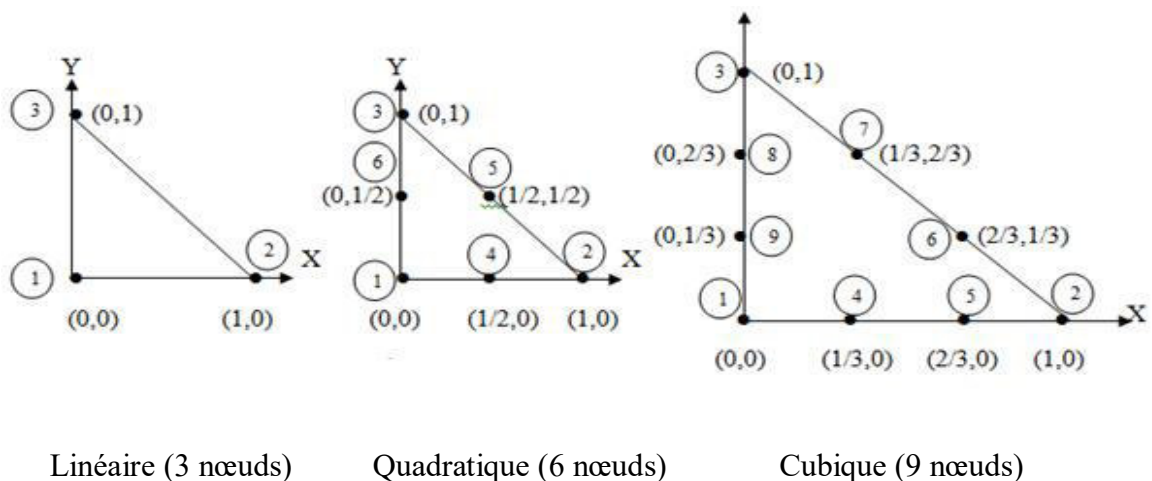
Nous présentons dans ce qui suit quelques éléments :

- **Éléments à une dimension**



**Figure III. 2 : Éléments à une dimension**

- **Éléments à deux dimensions**
- **Éléments triangulaires**



**Figure III. 3 : Éléments à deux dimensions**

• **Éléments carrés**

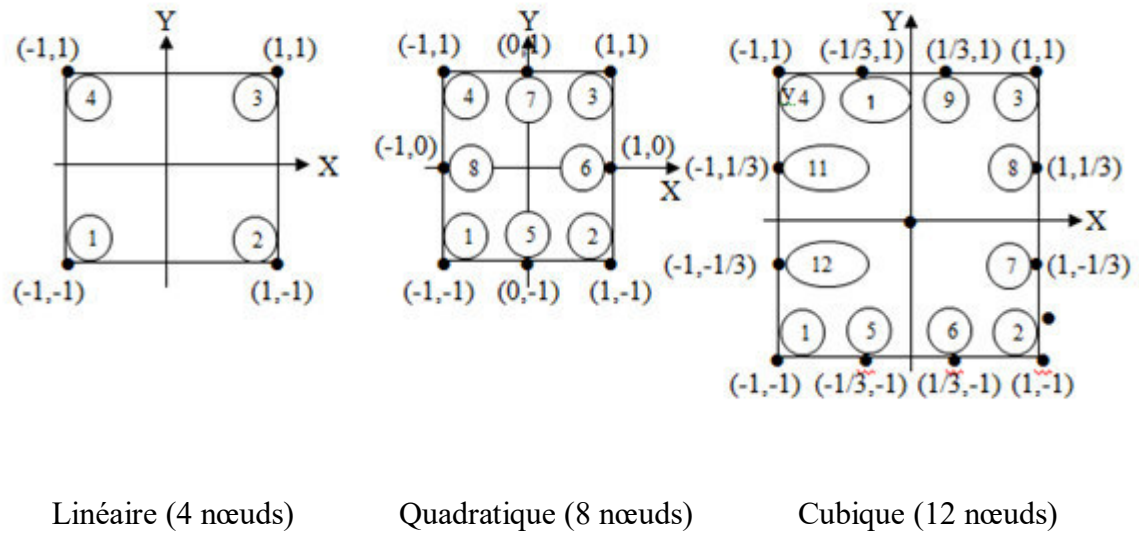


Figure III. 4 : Éléments carrés

• **Éléments à trois dimensions**

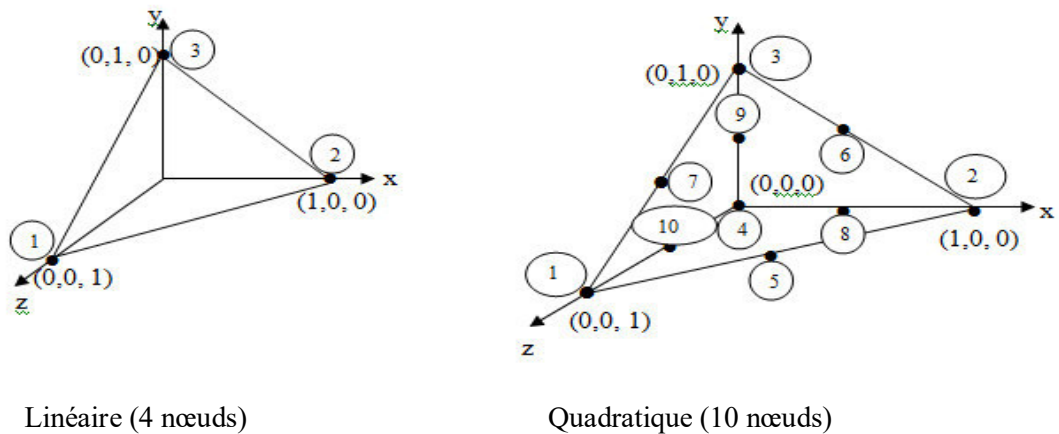


Figure. III. 5 : Éléments à trois dimensions

Étant donné que le logiciel de simulation utilisé Ansys-Maxwell fait appel à l'élément triangulaire linéaire, on ne s'intéressera dans la suite qu'à celui-ci.

➤ **Fonction d'interpolation**

Les fonctions d'interpolation sont obtenues à partir du triangle de Pascal, donné ci-dessous :

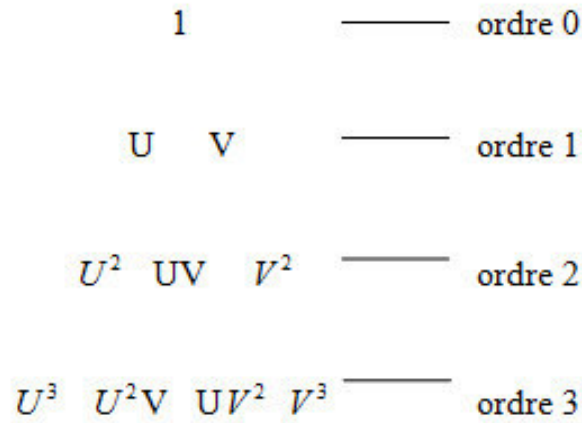


Figure III. 6 : Triangle de Pascal

Ces fonctions sont construites de telle sorte à obéir à deux principes.

➤ **Principe de l'état complet**

Le nombre de termes de la fonction doit être égal au nombre de nœuds de l'élément.

La fonction doit contenir un terme constant

➤ **Principe de comptabilité**

Celui-ci est explicité par la continuité de la fonction.

Dans le cas d'un élément triangulaire linéaire, la fonction d'interpolation est donnée par :

$$\alpha(x, y) = a \cdot x + b \cdot y + c \tag{III.28}$$

➤ **Fonction d'approximation sur le domaine**

Dans le domaine global contenant N nœuds, l'inconnu s'exprime alors :

$$A = \sum_{j=1}^N \alpha_j A_j \tag{III.29}$$

**III. 6. Formulation éléments finis de l'équation magnétodynamique**

L'équation magnétodynamique dans le cas comportant une source est donnée par :

$$\vec{\nabla} \wedge \nu \vec{\nabla} \wedge \vec{A} + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_z \tag{III.30}$$

En considérant le régime harmonique, l'équation (III.30) s'écrit :

$$\vec{\nabla} \wedge \nu \vec{\nabla} \wedge \vec{A} + j\sigma\omega\vec{A} = \vec{J}_z \tag{III.31}$$

Après transformation (III.31) l'équation devient :

$$-\left(\frac{\partial}{\partial x}\left(v\frac{\partial A_z}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v\frac{\partial A_z}{\partial y}\right)\right) + j\omega\sigma A_z = J_z \quad (\text{III.32})$$

La formulation intégrale de l'équation (III.35) est donnée par :

$$\iint_{\Omega} \alpha_i \cdot \left(-\left(\frac{\partial}{\partial x}\left(v\frac{\partial A_z}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v\frac{\partial A_z}{\partial y}\right)\right) + j\omega\sigma A_z - J_z\right) \cdot dx dy = 0 \quad (\text{III.33})$$

L'équation (III.33) peut être réécrite comme suit :

$$\iint_{\Omega} \alpha_i \cdot \left(-\frac{\partial}{\partial x}\left(v\frac{\partial A_z}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(v\frac{\partial A_z}{\partial y}\right)\right) \cdot dx dy + j\omega \iint_{\Omega} \alpha_i \cdot \sigma \cdot A_z \cdot dx dy = \iint_{\Omega} \alpha_i \cdot J_z \cdot dx dy \quad (\text{III.34})$$

L'application du théorème de Green, nous permet d'écrire :

$$\left\{ \begin{aligned} & \iint_{\Omega} \alpha_i \cdot \left(\frac{\partial}{\partial x}\left(v\frac{\partial A_z}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v\frac{\partial A_z}{\partial y}\right)\right) \cdot dx dy & (\text{III.35}) \\ & = - \iint_{\Omega} v \left(\frac{\partial \alpha_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial A_z}{\partial x} + \frac{\partial \alpha_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial A_z}{\partial y}\right) \cdot dx dy + \int_{\Gamma} v \cdot \left(\frac{\partial A_z}{\partial x} \cdot \alpha_i \cdot \cos(n, x) + \frac{\partial A_z}{\partial y} \cdot \alpha_i \cdot \cos(n, y)\right) d\Gamma \\ & = \iint_{\Omega} v \cdot \overrightarrow{\nabla \alpha_i} \cdot \overrightarrow{\nabla A_z} dx dy + \int_{\Gamma} v \cdot \alpha_i \frac{\partial A_z}{\partial n} \cdot d\Gamma \end{aligned} \right.$$

En remplaçant (III.37) dans (III.38) on obtient :

$$\iint_{\Omega} v \cdot \overrightarrow{\nabla \alpha_i} \cdot \overrightarrow{\nabla A_z} dx dy - \int_{\Gamma} v \cdot \alpha_i \frac{\partial A_z}{\partial n} \cdot d\Gamma + j\omega \iint_{\Omega} \alpha_i \cdot \sigma \cdot A_z \cdot dx dy = \iint_{\Omega} \alpha_i \cdot J_z \cdot dx dy \quad (\text{III.36})$$

Dans le cas de conditions aux limites type Dirichlet ou Neumann homogène le terme sur la frontière s'annule, ce qui revient à écrire :

$$\int_{\Gamma} v \cdot \alpha_i \frac{\partial A_z}{\partial n} \cdot d\Gamma = 0$$

L'expression (III.36) devient alors :

$$\iint_{\Omega} v \cdot \overrightarrow{\nabla \alpha_i} \cdot \overrightarrow{\nabla A_z} dx dy + j\omega \iint_{\Omega} v \cdot \alpha_i \cdot A_z \cdot dx dy = \iint_{\Omega} \alpha_i \cdot J_z \cdot dx dy \quad (\text{III.37})$$

Sachant que :

$$A = \sum_{j=1}^N \alpha_j A_j \quad (\text{III.38})$$

Et en remplaçant dans (III.37) on obtient alors :

$$\sum_{j=1}^N [\iint_{\Omega} v \cdot \overline{\nabla \alpha_i} \cdot \overline{\nabla \alpha_j} dx dy] \cdot A_j + j\omega \cdot \sum_{j=1}^N [\iint_{\Omega} \sigma \cdot \alpha_i \cdot \alpha_j dx dy] \cdot A_j = \iint_{\Omega} \alpha_i \cdot J_z \cdot dx dy \quad (\text{III.39})$$

L'écriture de (III.38) pour tous les nœuds du domaine nous permet d'aboutir au système matriciel suivant :

$$[M] \cdot [A] + j\omega \cdot [L] \cdot [A] = [K] \quad (\text{III.40})$$

Avec

$$M_{ij} = \iint_{\Omega} v \cdot \overline{\nabla \alpha_i} \cdot \overline{\nabla \alpha_j} dx dy \quad (\text{III.41})$$

$$L_{ij} = \iint_{\Omega} \sigma \cdot \alpha_i \cdot \alpha_j dx dy \quad (\text{III.42})$$

$$K_i = \iint_{\Omega} \alpha_i \cdot J_z \cdot dx dy \quad (\text{III.43})$$

### III. 7. Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis

#### III. 7. 1 Avantages

- Adaptation aux géométries complexes.
- Prise en compte des non linéarités accrues.

#### III. 7. 2 Inconvénients

- Mise en œuvre relativement difficile.
- Prise en considération de domaines infinis.
- Présence de singularités dans le domaine d'étude.
- Temps de calcul relativement important.

### III. 8. Méthodes de calcul de la force magnétique

En génie électrique, le calcul des forces magnétiques globales qui agissent les parties mobiles est d'un grand intérêt, car elles jouent un rôle déterminant dans tout système électromagnétique-mécanique en termes de déformation ou de déplacement [18].

Pour calculer la force magnétique on peut utiliser les quatre méthodes suivantes :

- La méthode de la force de Lorenz
- La méthode du tenseur de Maxwell
- La méthode des travaux virtuels
- La méthode de la variation de la Co-énergie ou de l'énergie magnétique

**III. 9. La méthode de la variation de la Co-énergie**

$$C_{em} = \frac{\partial \bar{W}}{\partial \theta} \quad (\text{III.44})$$

$$\bar{W} = \int_S (\int_0^H B dH) dS \quad (\text{III.45})$$

Le principe de cette méthode consiste à l'utilisation de la méthode des éléments finis.

L'équation mécanique considérée est donnée par :

$$J\beta + \lambda\omega = C_{em} - C_r \quad (\text{III.46})$$

Dans ce cas la force magnétique est obtenue en calculant la dérivée de la co-énergie magnétique par rapport au déplacement [18]

**III. 10. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équations de Maxwell, sur la base desquelles tous les phénomènes électromagnétiques peuvent être modélisés. Nous nous sommes intéressés au modèle magnétodynamique qui permet de calculer la distribution du champ magnétique et les performances électromagnétiques d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil.

Pour résoudre l'équation de la magnétodynamique, nous avons présenté la formulation éléments finis basée sur la méthode de Galerkin qui permet d'aboutir à un système algébrique symétrique, donc plus simple à résoudre.

# *Chapitre IV*

## *Applications et résultats*

**IV. 1. Introduction**

Cette étude a pour but de calculer et de bien évaluer les performances d'un moteur asynchrone fabriqué par l'entreprise Electro-Industries.

Nous nous engagerons dans un calcul par éléments finis d'un moteur de moyenne puissance de l'ordre de 15 kW à cage d'écureuil, les caractéristiques électromécaniques sont obtenues grâce à des simulations réalisées sous l'environnement Ansys-Maxwell.

Ce travail permettra aussi de comparer et de conforter les résultats de quelques caractéristiques électromagnétiques obtenus avec une méthode analytique dite classique en l'occurrence la « méthode de LIWSCHITZ ».

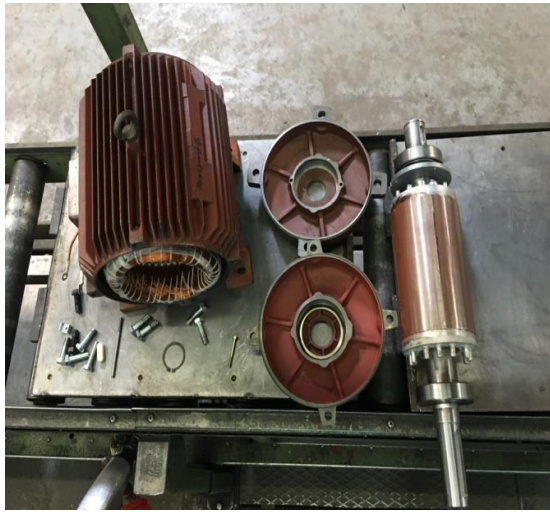
**IV. 2. Présentation de la machine**

La machine étudiée est une machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil, de puissance de 15 kW, fabriquée par l'entreprise Electro-Industries de d'Azazga. Les paramètres géométriques et physiques de la machines sont donnés par le tableau IV. 1 et l'annexe 1 et 2

<b>Paramètres</b>	<b>Valeur</b>
<b>Tension d'alimentation</b>	$U_n=400$ V
<b>Puissance</b>	P=15 KW
<b>vitesse nominale</b>	$N_n=1465$ Tr/min
<b>Nombre des pôles</b>	2P=4
<b>Longueur de la machine</b>	195 mm
<b>Nombre d'encoche statorique</b>	36 encoches
<b>Nombre d'encoche rotorique</b>	28 encoches

**Tableau IV 1 : cahier de charge de la machine étudié**

La figure IV. 1 montrent quelques photos du moteur modélisé avant et après son montage



(a) Moteur explosé



(b) Stator du moteur



(c) Vue du moteur monté

**Figure IV. 1 : moteur asynchrone à cage d'écureuil 15 kW**

### IV. 3. 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.

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 :

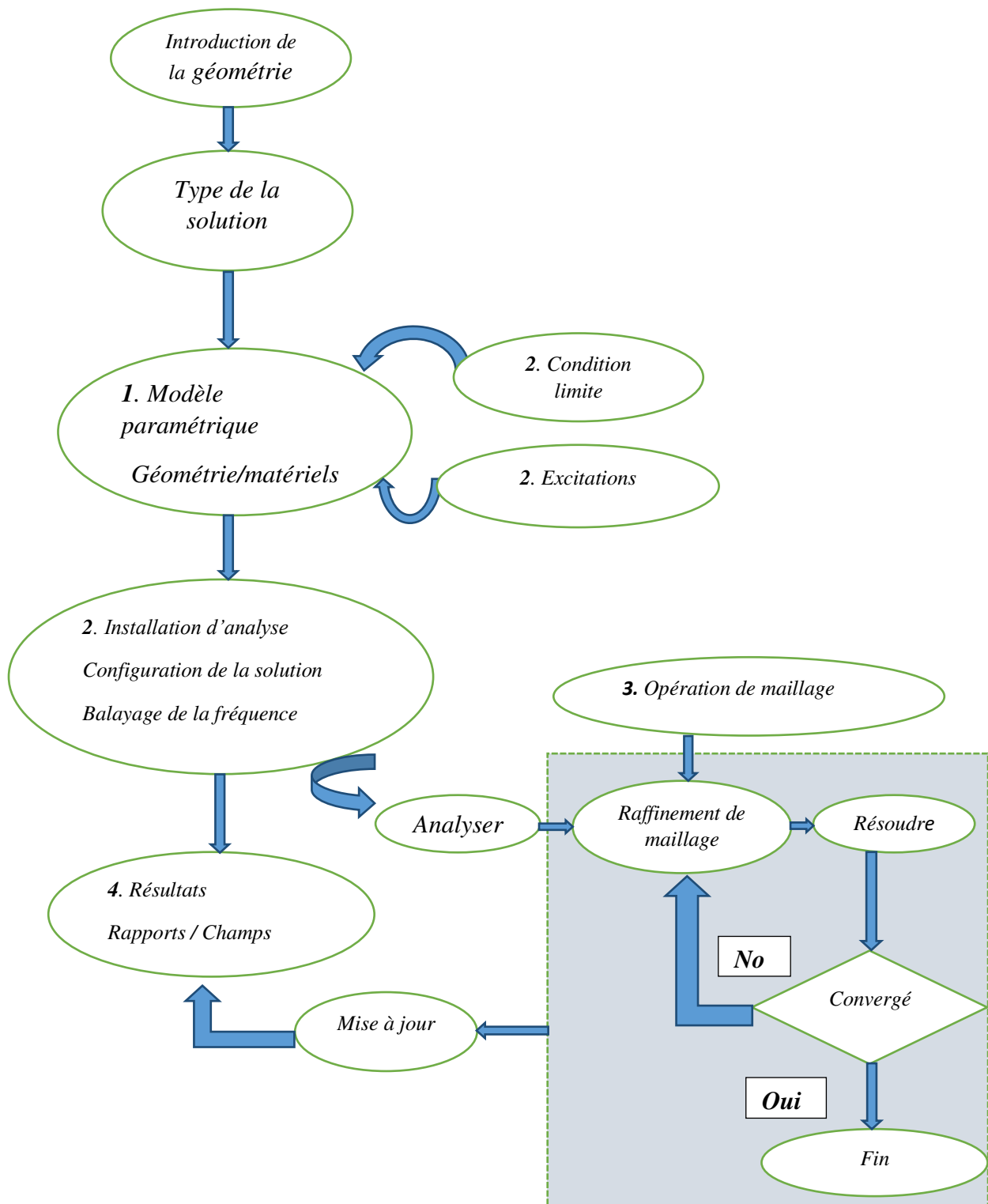


Figure IV. 2 : Organigramme de simulation

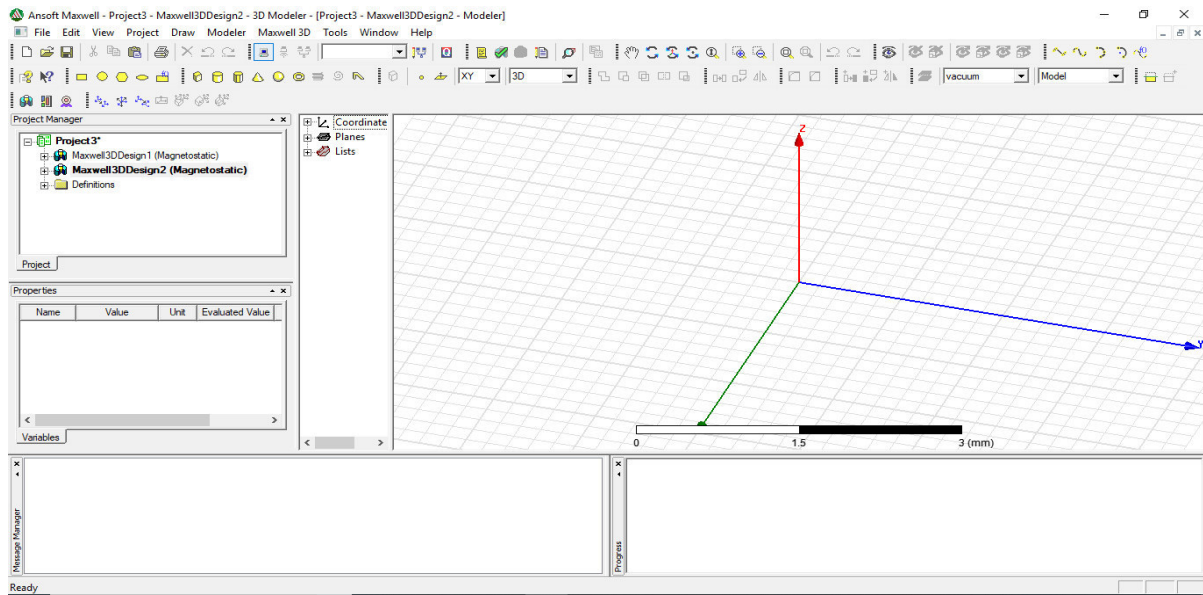


Figure IV .3: Interface de logiciel Ansys-Maxwell

#### IV. 4. Simulation de la machine

La figure (IV. 4) 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.

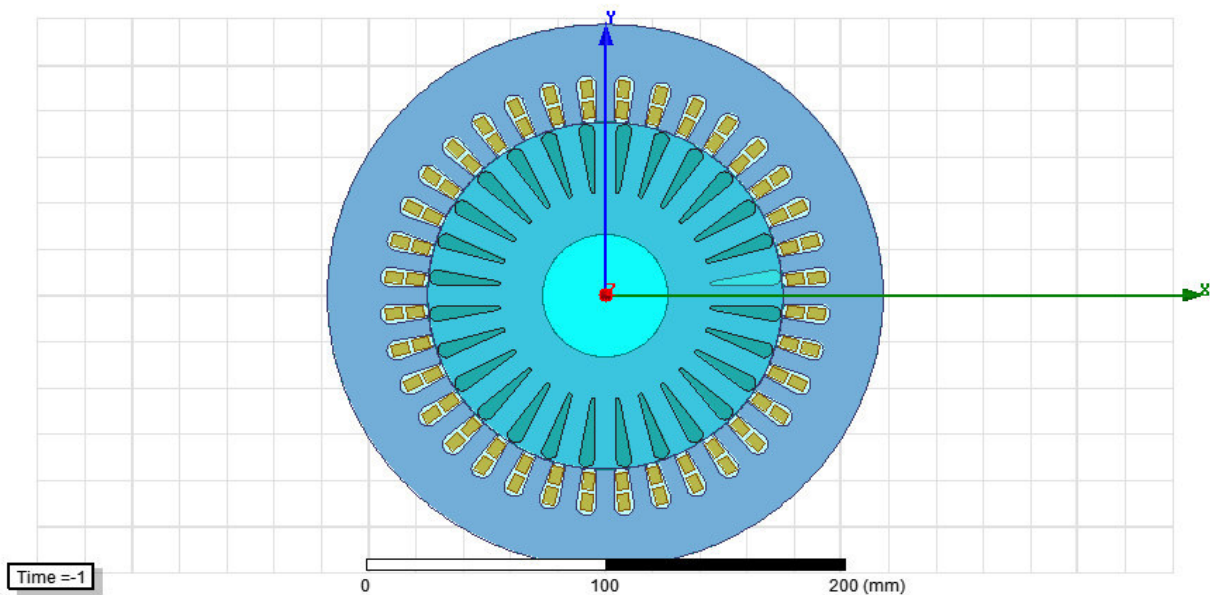


Figure IV. 4 : Coupe transversale de la machine sous l’environnement Ansys-Maxwell

La figure (IV.5) 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.

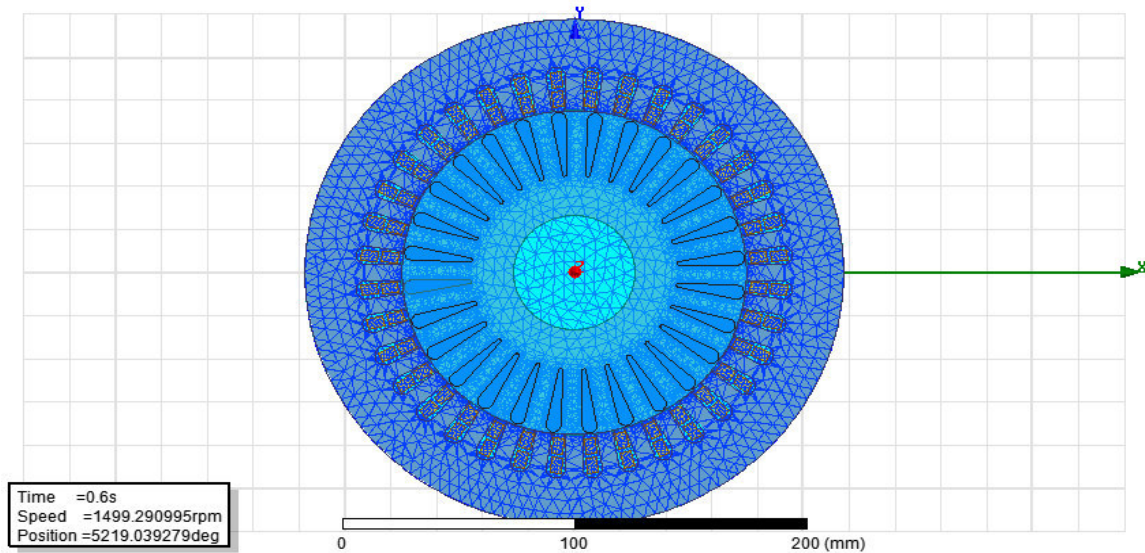


Figure IV. 5 : maillage de moteur

#### IV. 4. 1. Calcul du bobinage

Le bobinage du moteur est de type concentrique, double couches est calculé à partir des paramètres suivants :

- $Z_1$  : nombre d'encoche
- $2p$  : nombre de pôles
- $p$  : nombre de paires de Pôles
- $m_1$  : nombre de phase

Les paramètres de sa construction sont donnés par les formules suivantes :

➤ **Le pas polaire**

$$y_1 = \frac{Z_1}{2p} \tag{IV.I}$$

Notre pas polaire est raccourcis, on multiple par le facteur  $\frac{7}{9}$

➤ **nombre d'encoche par pole et par phase**

$$q_1 = \frac{Z_1}{2p.m_1} \tag{IV.II}$$

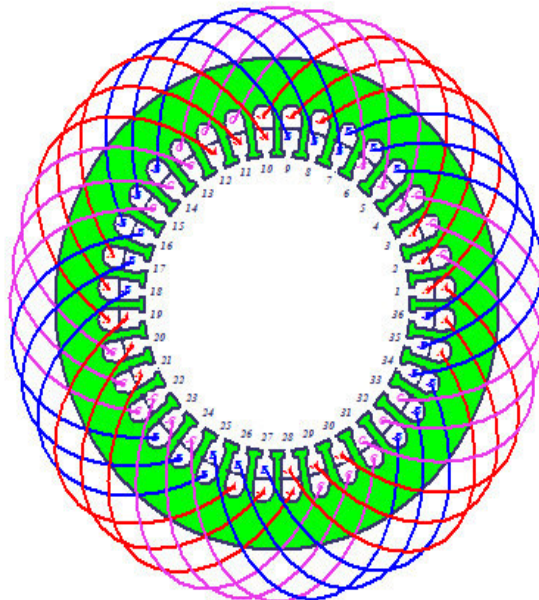
➤ **décalage entre deux phases consécutives**

$$\alpha = \frac{Z_1}{p.m_1} \tag{IV.III}$$

Paramètre de bobinage	Valeur numérique
$y_1$	7
$q_1$	3
$\alpha$	6

**Tableau IV. 2 : Tableau illustratives des résultats paramètres de bobinages**

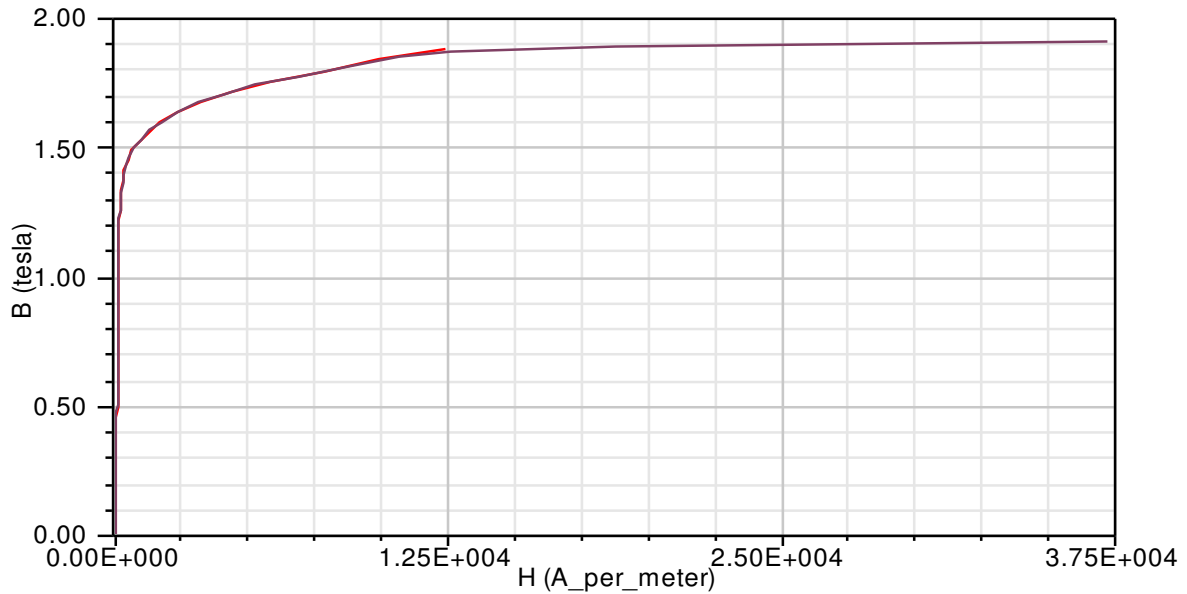
Les paramètres trouvés ont été appliqués pour concevoir notre bobinage sur le logiciel. La figure (IV. 6) représente la distribution obtenue :



**Figure IV. 6 : Distribution de bobinage**

#### IV. 4. 2. La Courbe de première aimantation

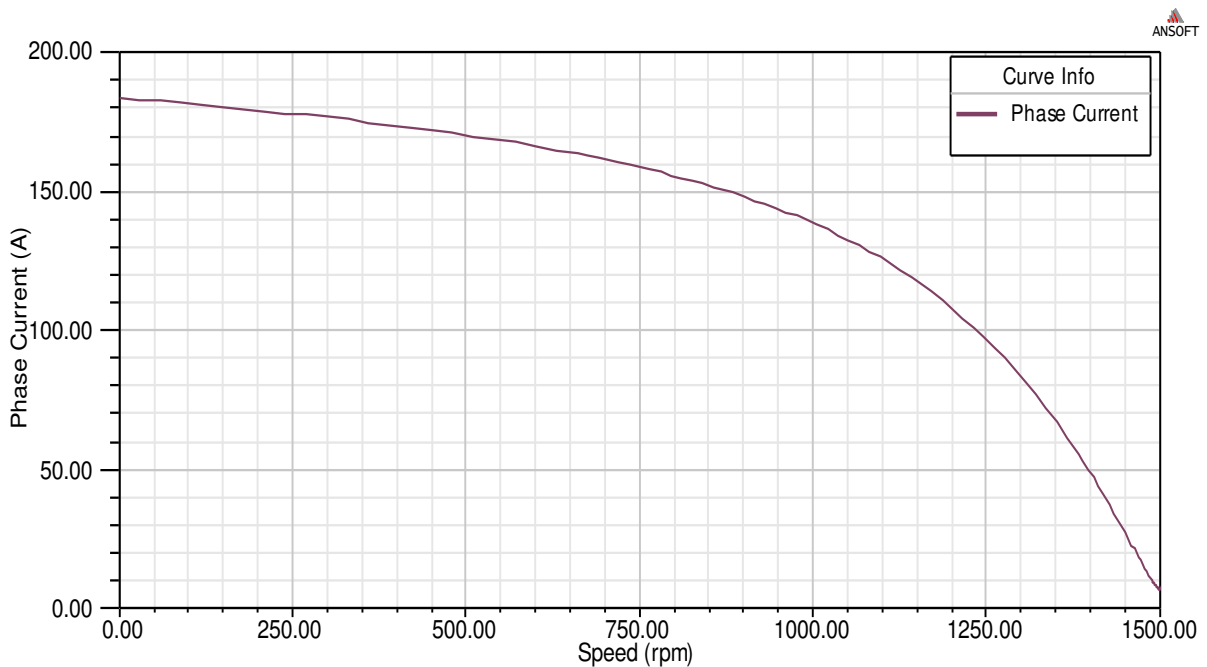
La courbe B-H est la courbe caractéristique des propriétés magnétiques d'un matériau, elle indique comment le matériau réagit à un champ magnétique externe et constitue une information essentielle lors de la conception de circuit magnétique des machines électriques. La tôle utilisée pour la fabrication du circuit magnétique de notre moteur est de type Fer-Si, sa courbe de première alimentation est donnée par la figure ci-dessous :



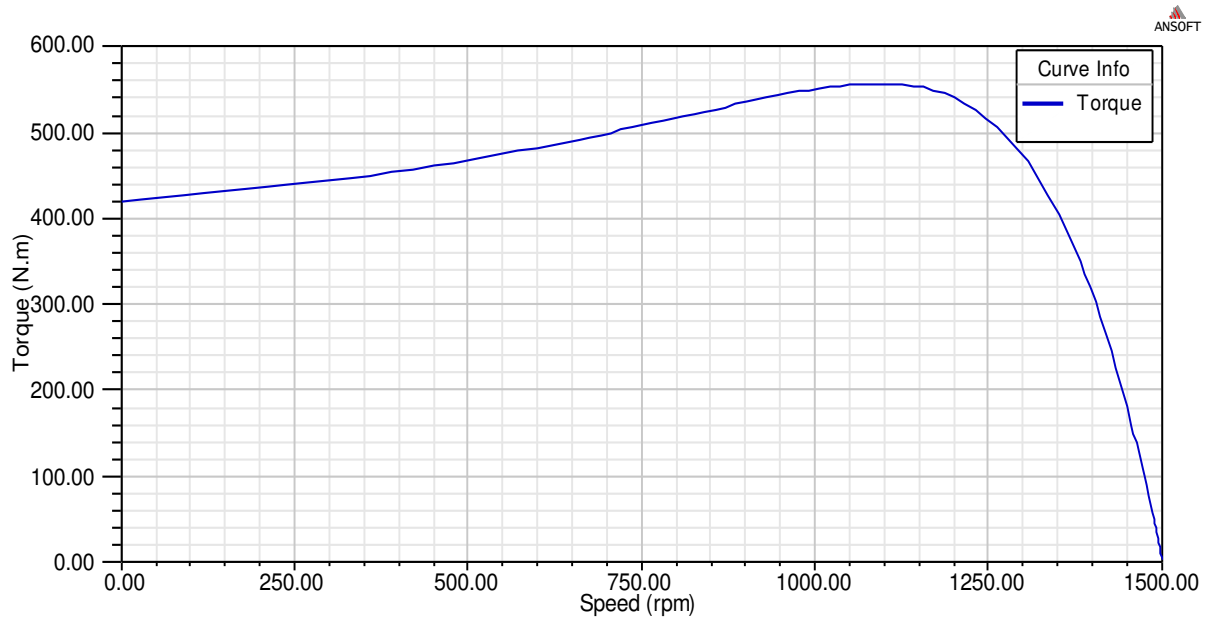
**Figure IV. 7 : Courbe de première aimantation de la tôle magnétique utilisée à Electro-Industries.**

#### IV. 5. Caractéristiques électrique et mécanique

Les figures (IV.8) et (IV.9) représentent respectivement les caractéristiques électrique et mécanique, du moteur. On voit bien que les allures obtenues correspondent à celles d'un moteur de classe B de la classification NEMA.



**Figure IV. 8 : Courant de phase en fonction de la vitesse.**



**Figure IV. 9 : Couple du moteur en fonction de la vitesse.**

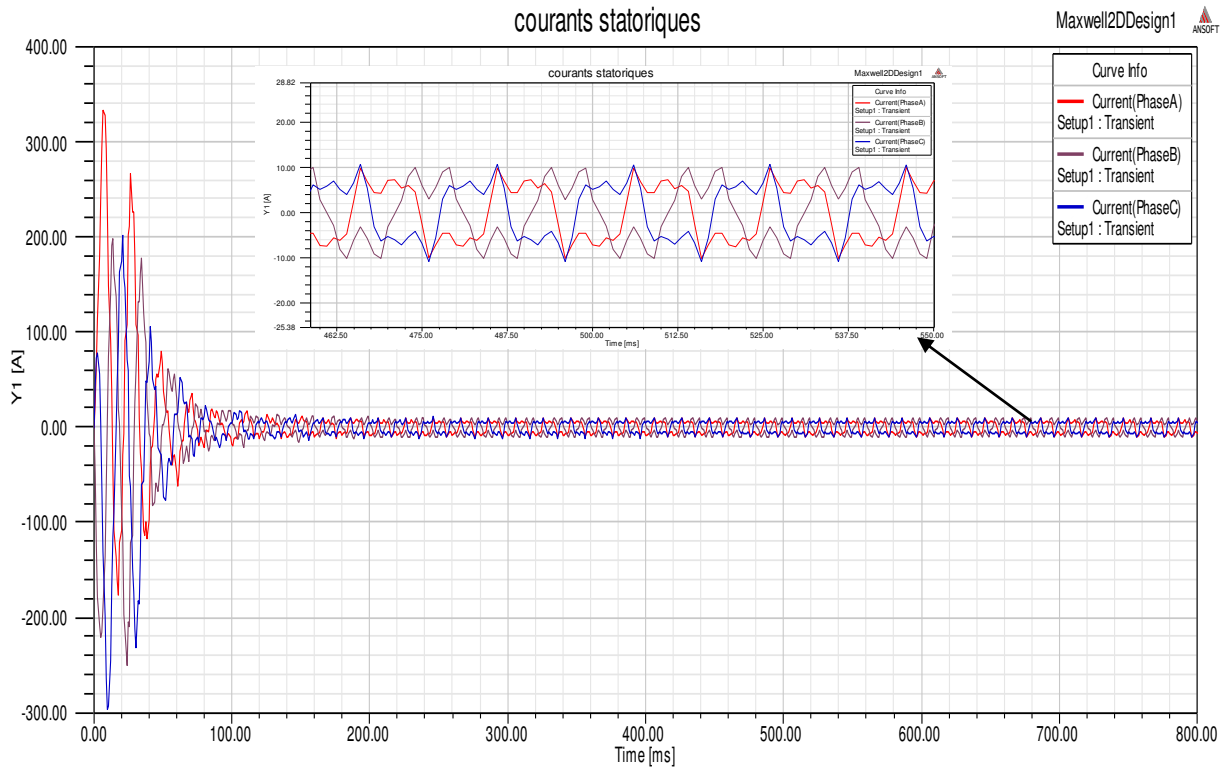
Au démarrage, le courant rotorique dans un barreau se concentre vers l'entrefer ; cela diminue la section de passage du courant et accroît la résistance du barreau. En marche (fréquence basse) le courant circule uniformément dans la section du barreau et la résistance de la partie du conducteur utilisée est plus faible. On conçoit qu'un tel moteur se comporte comme un moteur à double cage.

#### IV. 6. 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).

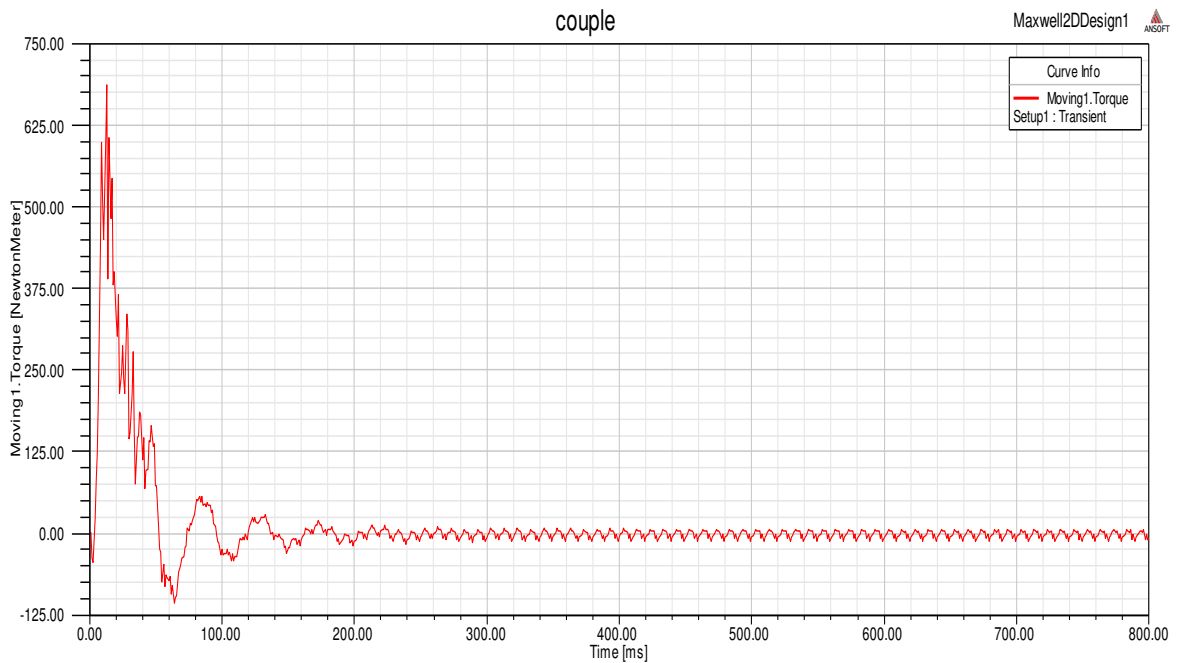
La machine asynchrone n'entraînant pas de charge mécanique ( $C_{ch} = 0$  N.m), la puissance utile est donc nul, il existe cependant un couple résistant de très faible valeur équivalent aux pertes par frottement et ventilation de ce fait donc le glissement est presque nul ( $g \approx 0$ ).

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 :

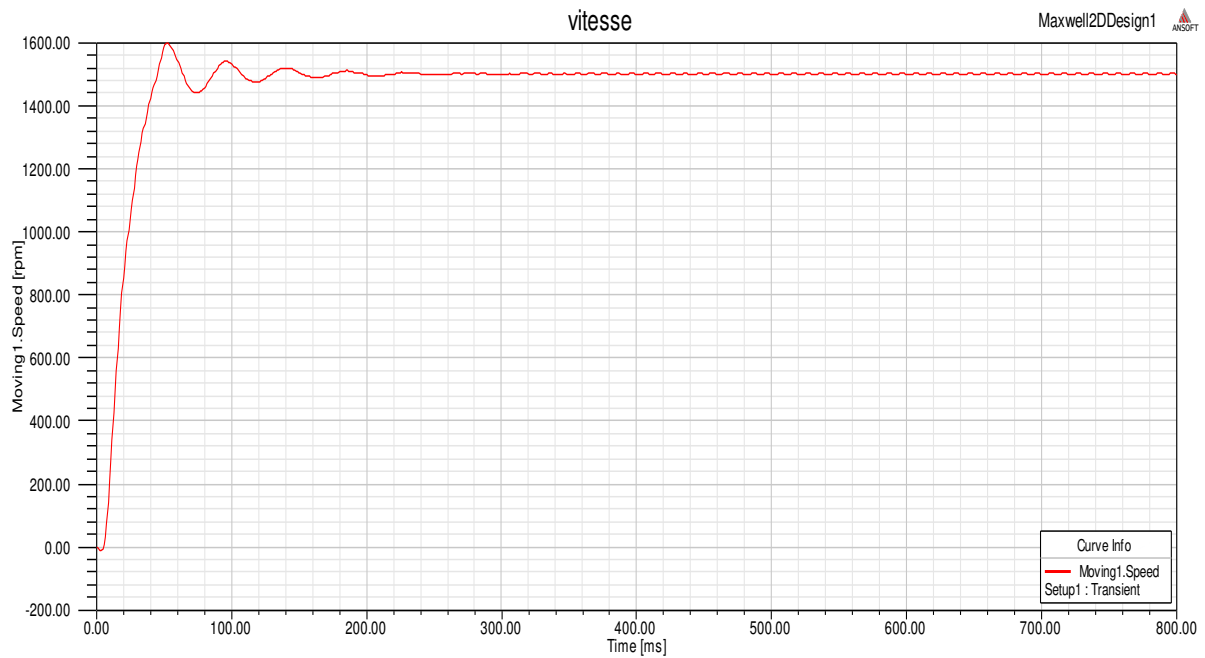


**Figure IV. 10 : Courants statoriques à vide.**

Les courants de démarrage dans le régime transitoire représentent l'un des gros problèmes de la machine asynchrone. Il apparait un courant intense, ce courant est de l'ordre de 5 à 10 le courant nominal, ce qui crée à la fois une contrainte au moteur lui-même et une gêne pour le réseau.



**Figure IV. 11 : Couple du moteur à vide**

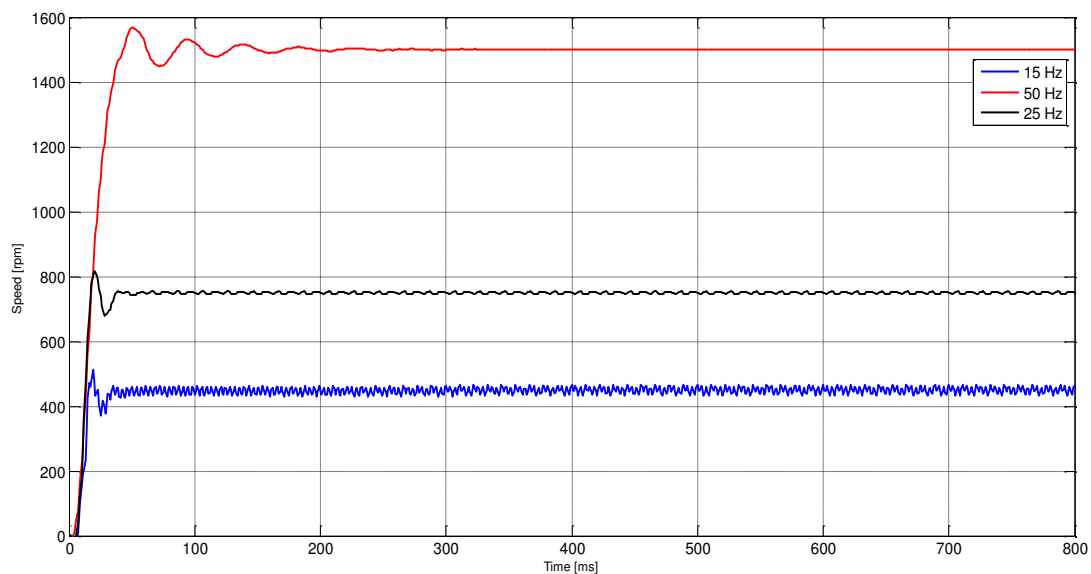


**Figure IV. 12 : Vitesse du moteur à vide.**

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. 6. 1. Variation de la fréquence d'alimentation

Dans ce qui suit, nous avons fait varier la fréquence d'alimentation de notre machine, les réponses obtenues sont données par la figure (IV 13) :



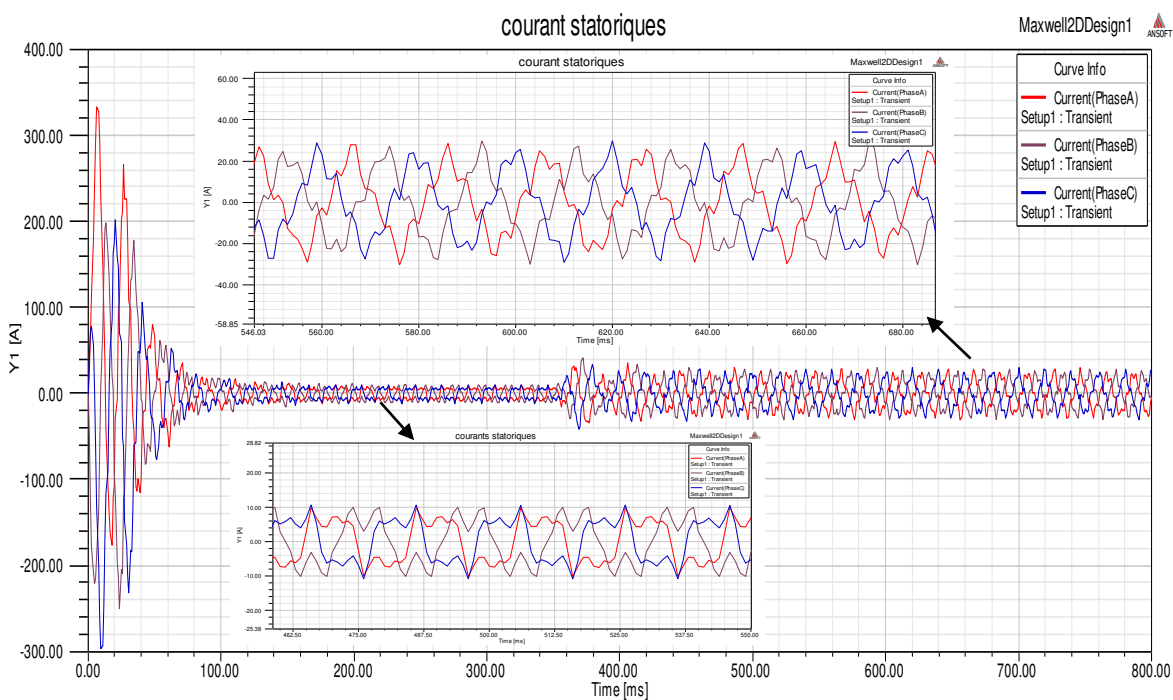
**Figure IV. 13 : Vitesse du moteur en fonction de la fréquence d'alimentation.**

On remarque que le moteur répond correctement à la variation de la fréquence car la vitesse est proportionnelle à cette dernière.

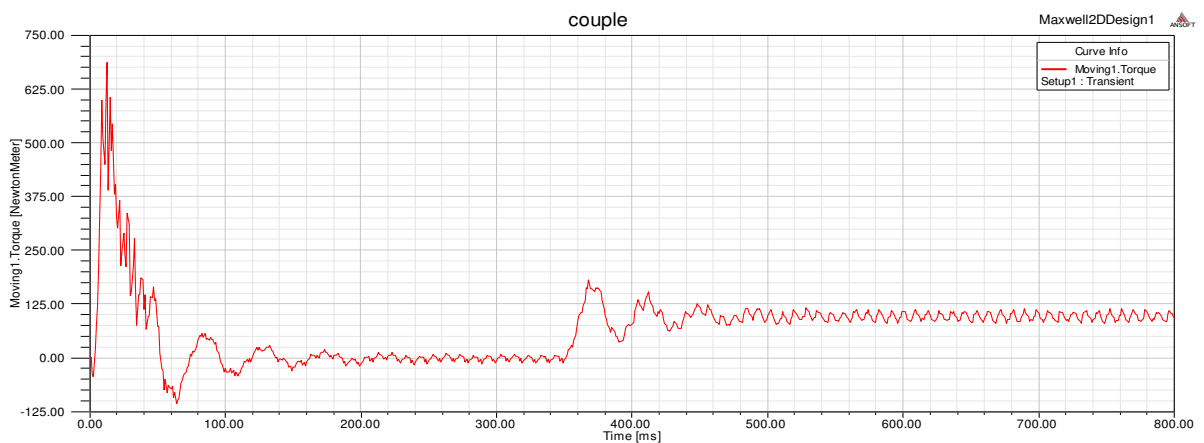
**IV. 7. Essai en charge**

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 97.28 N.m, 80 N.m et 60 N.m.



**Figure IV. 14 : Courant statorique pour une charge de 97.28 N.m**



**Figure IV. 15 : Couple de moteur pour une charge 97.28 N.m**

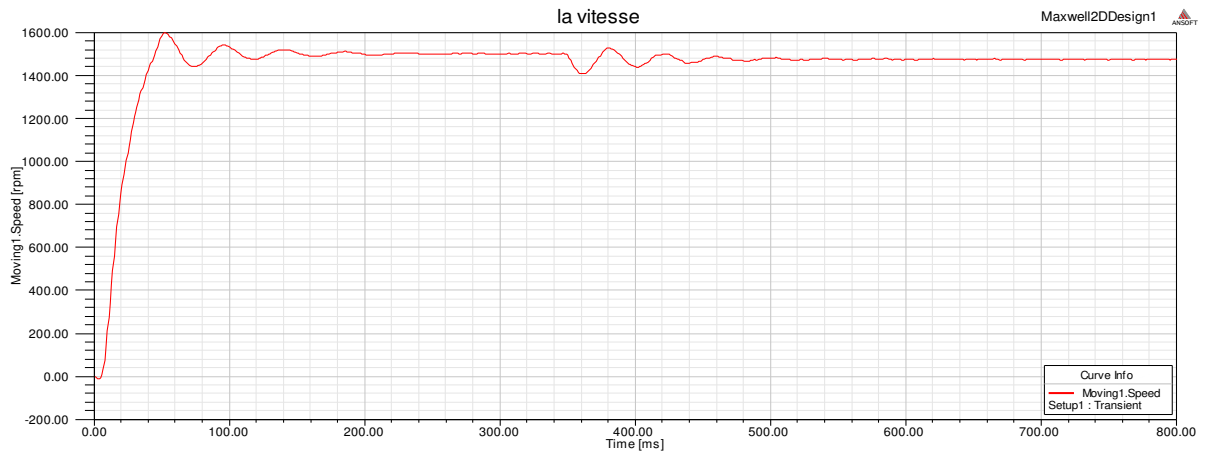


Figure IV. 16 : Vitesse du moteur pour une charge 97.28 N.m

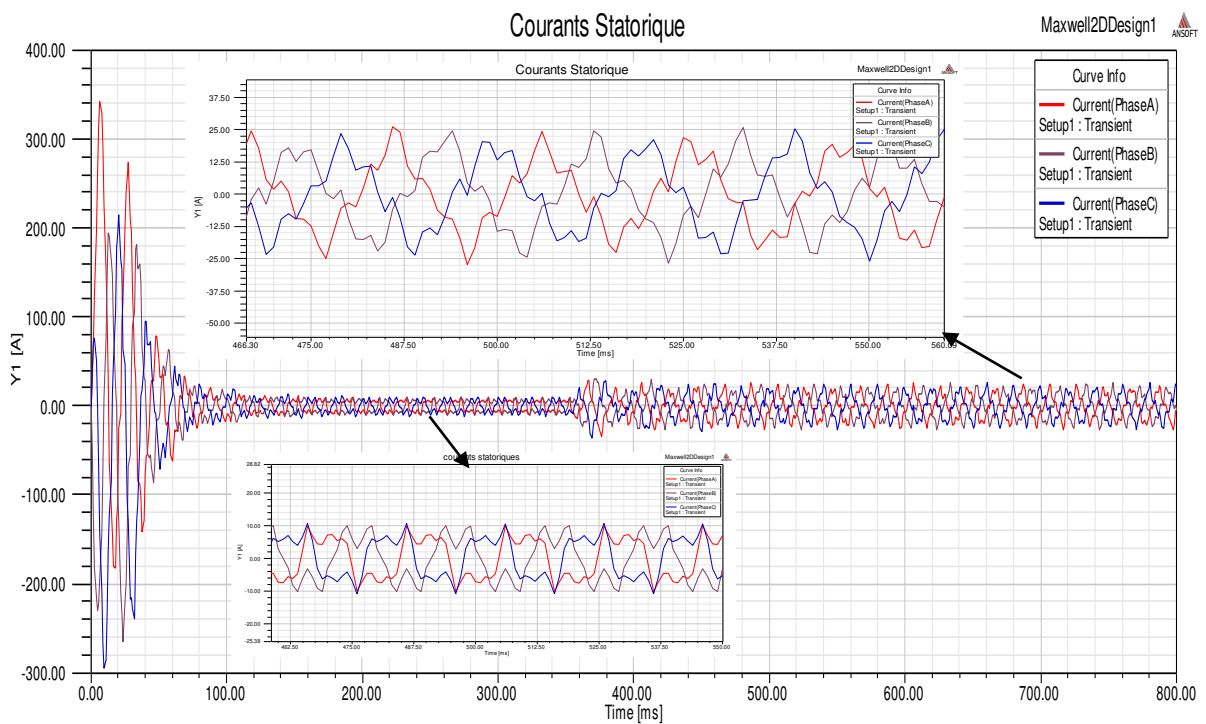


Figure IV. 17 : Courant statorique pour une charge de 80 N.m

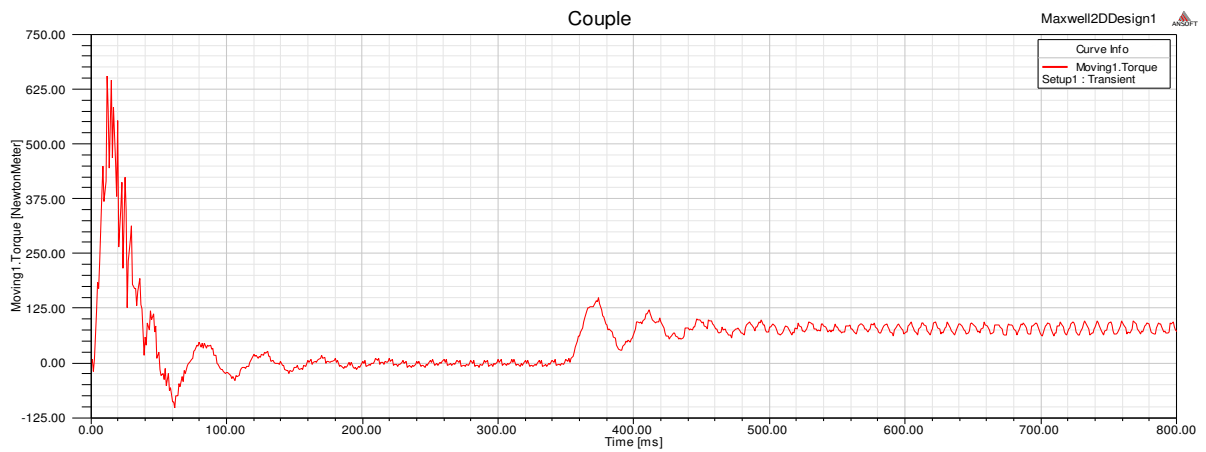


Figure IV. 18 : Couple de moteur pour une charge 80 N.m

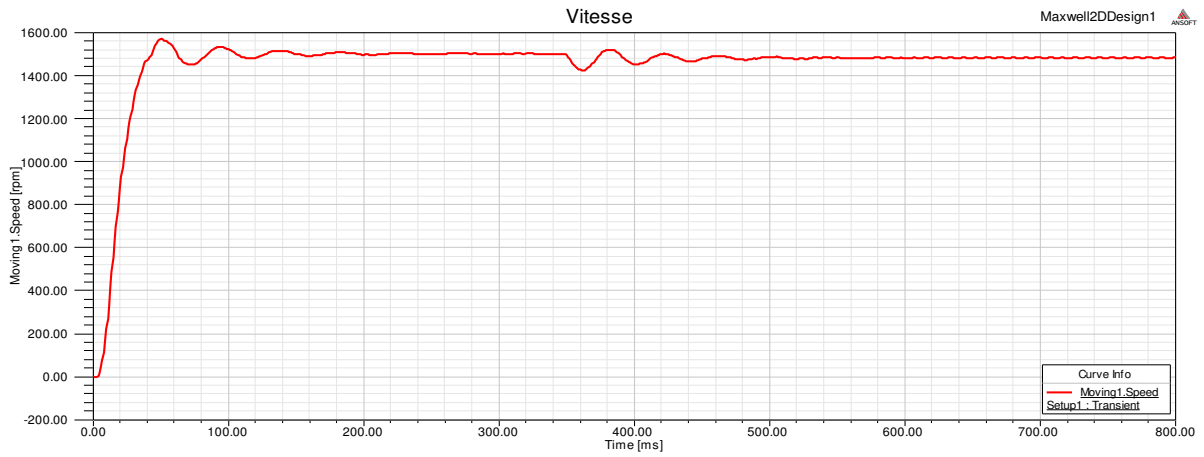


Figure IV. 19 : Vitesse du moteur pour une charge 80 N.m.

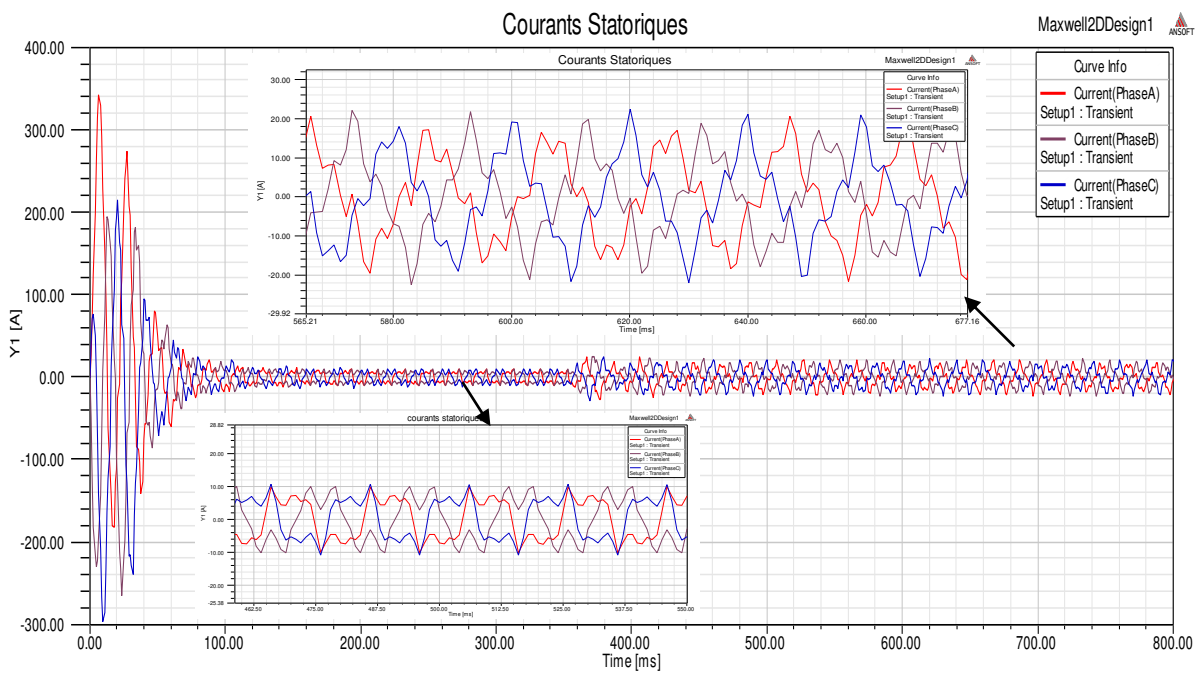


Figure IV. 20 : Courant statorique pour une charge de 60 N.m

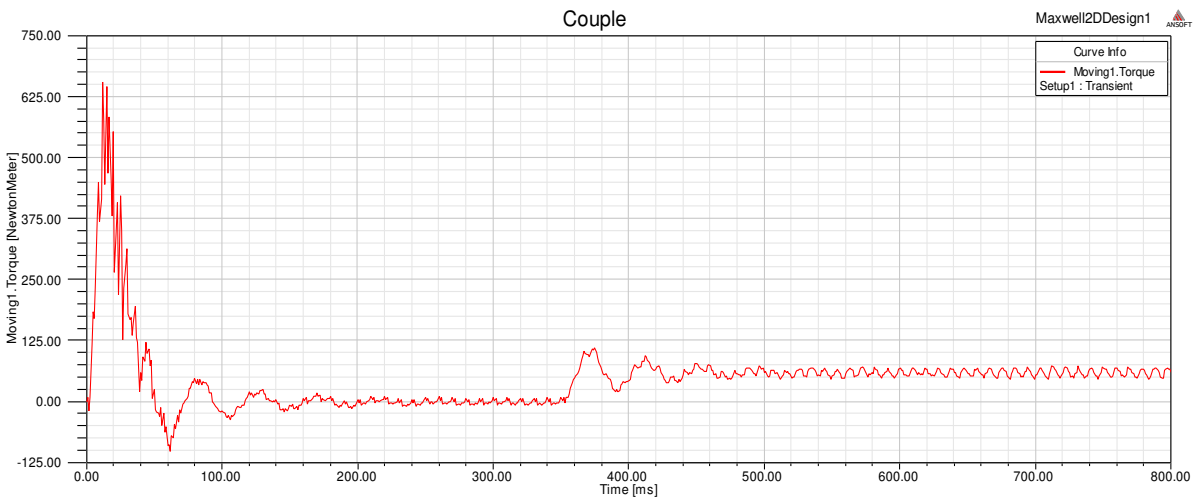
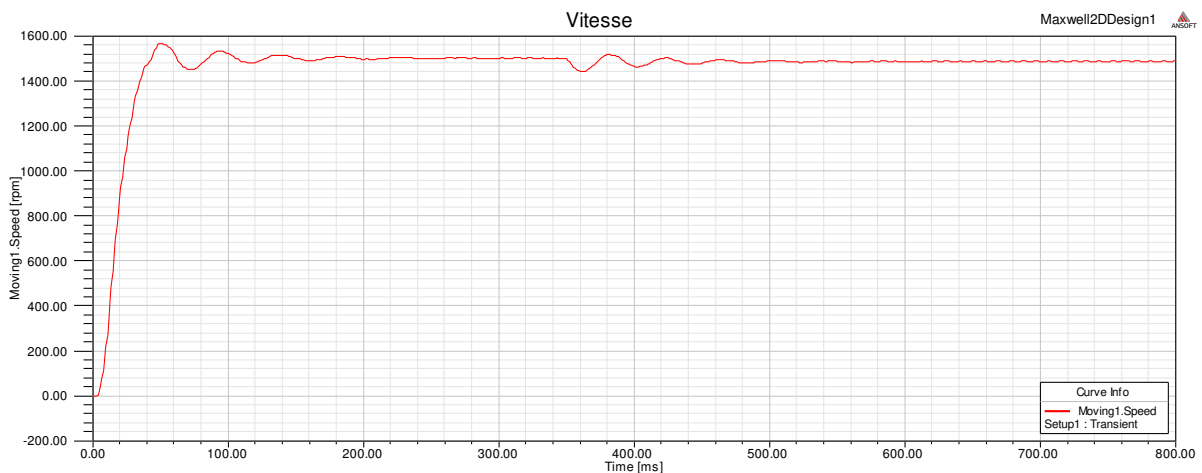


Figure IV. 21 : Couple de moteur pour une charge 60 N.m



**Figure IV. 22 : Vitesse du moteur pour une charge 60 N.m.**

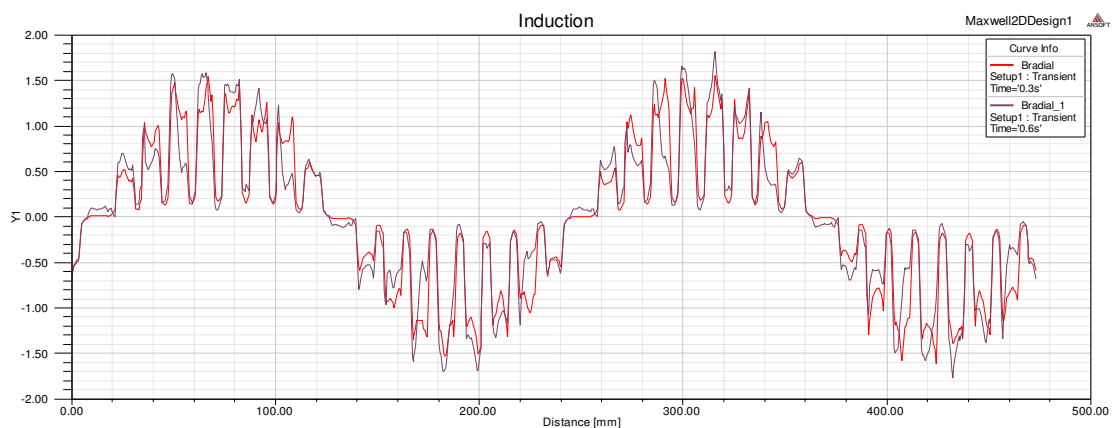
Le moteur tourne à une vitesse voisine de la vitesse synchrone lorsqu'il n'est pas chargé. Quand on le charge, il ralentit. Le champ tournant coupe alors les barres du rotor à une vitesse relative plus grande. Il en résulte que la tension induite et le courant dans le rotor augmentent de façon à développer 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. 7. 1. Induction dans l'entrefer

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



**Figure IV. 23 : 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. 7. 2. Cartographies du champ

Les figures (IV.24) et (IV.25) montrent la distribution des lignes de champ, l'induction et les densités des courants induits

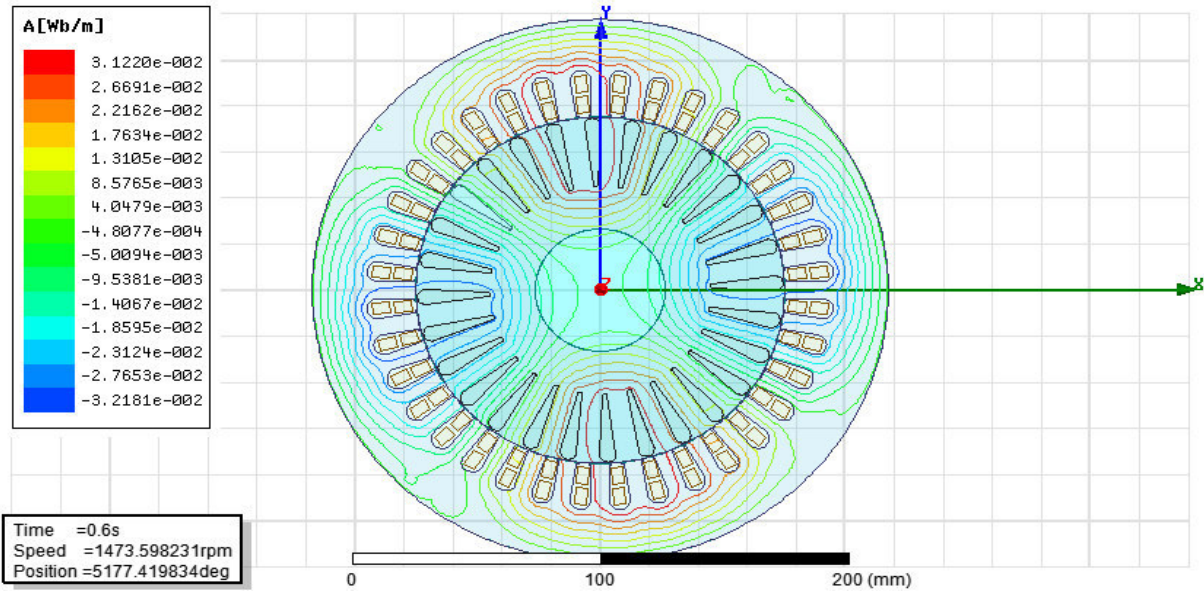


Figure IV.24 : Les lignes de champ

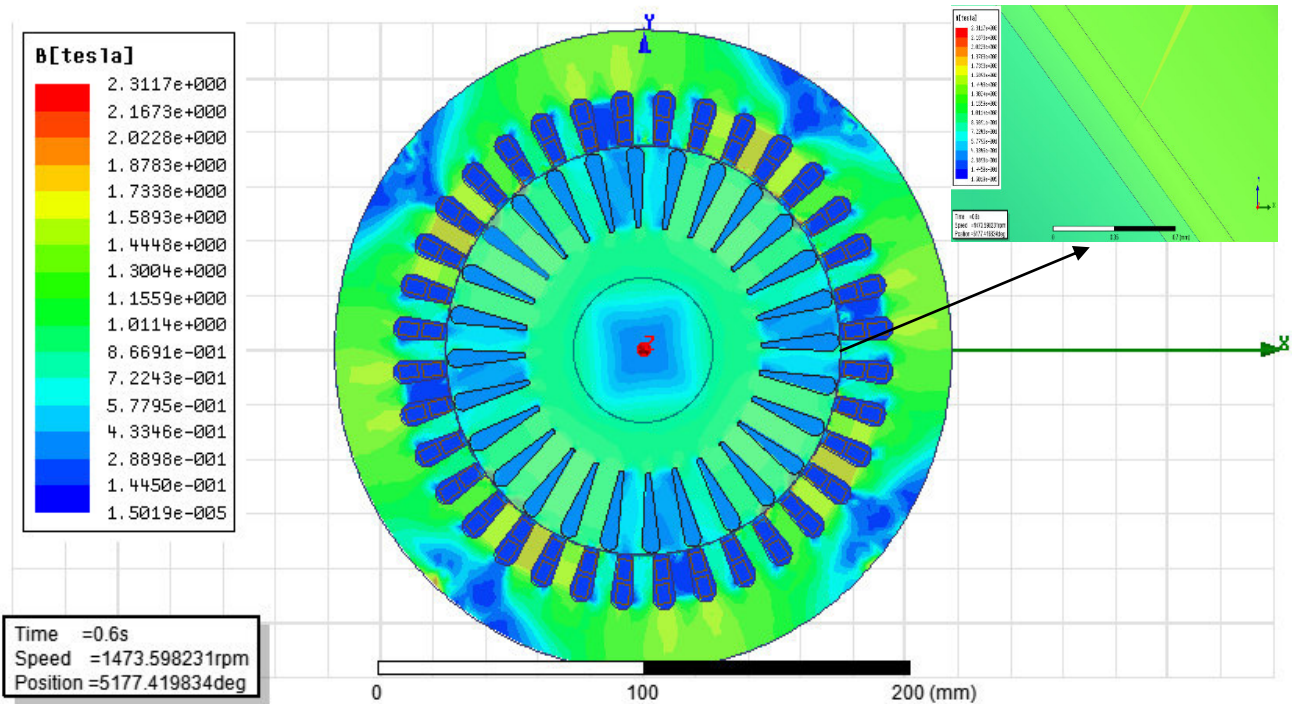


Figure IV. 25 : l'induction magnétique

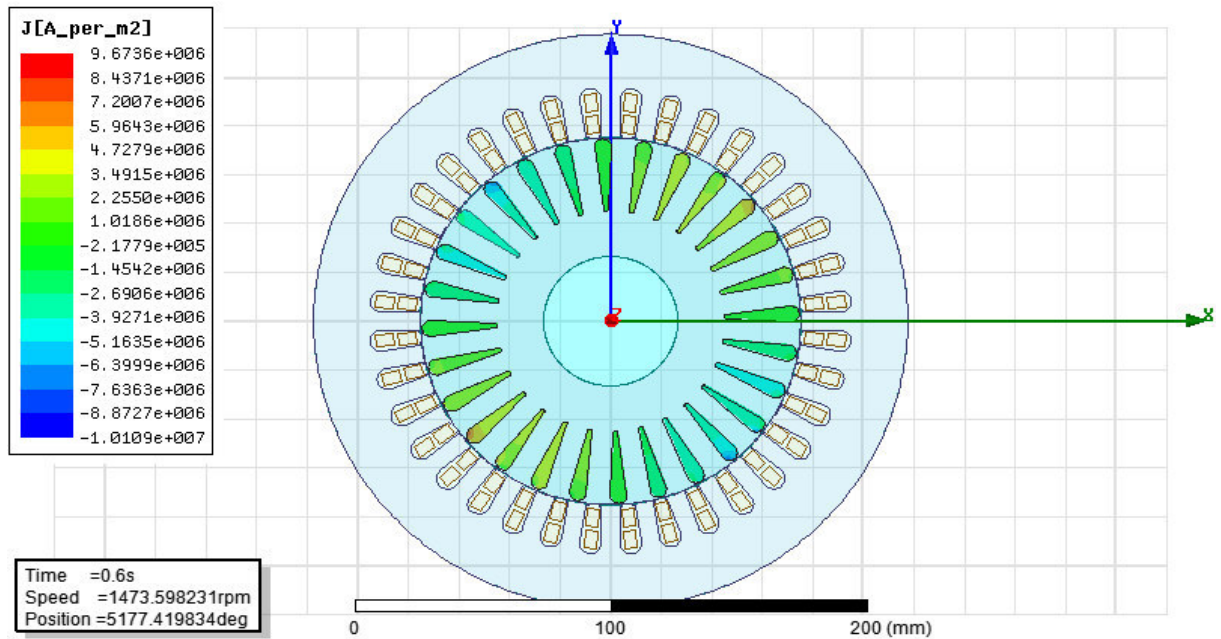


Figure IV. 26 : Densité de courant dans les barreaux rotoriques

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. 8. Calcul les paramètres électromagnétiques

##### IV. 8. 1. Puissance électromagnétique

C'est la puissance transmise du stator vers le rotor à travers vers l'entrefer. Elle donnée par l'expression suivante :

$$P_{em} = K_E \frac{P_n}{\eta \cos \varphi} \tag{IV.4}$$

##### IV. 8. 2. Force électromotrice

Si le flux d'un champ magnétique variable coupe un circuit conducteur qui'il apparait dans ce circuit une tension, La tension ainsi créée est orientée de façon à générer des courants s'opposant à la variation du flux.

Cette tension appelée la force électromotrice a donné par :

$$E_1 = K_E \cdot U_1 \tag{IV.5}$$

##### IV. 8. 3. Facteur de bobinage

Le facteur d'enroulement caractérise la topologie de l'enroulement dans l'espace tridimensionnel de la machine. Il est donné par l'expression suivante :

$$K_{enc1} = K_{d1} \cdot K_{r1} \cdot K_{ob} \tag{IV.6}$$

**IV. 8. 4. Facteur de distribution**

Le facteur de distribution est donné par la formule suivante :

$$K_{d1} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m_1}\right)}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2m_1 q_1}\right)} \quad (\text{IV.7})$$

**IV. 8. 5. Facteur de raccourcissement**

Le facteur de raccourcissement est donné par la formule suivante :

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

Avec :  $\beta$  rapport de raccourcissement

$$\beta = \frac{\gamma_1}{\tau} \quad (\text{IV.9})$$

**IV. 8. 6. Facteur d'obliquité**

Le facteur d'obliquité est donné par la formule suivante :

$$K_{ob} = \frac{\sin\left(\frac{\theta_e}{2}\right)}{\left(\frac{\theta_e}{2}\right)} \quad (\text{IV.10})$$

Avec  $\theta_e = p \cdot \theta_{géo}$  (IV.11)

**IV. 8. 7. Flux sous un pôle**

Cette grandeur est égale au flux de l'induction magnétique  $\vec{B}$  à travers une surface orientée  $\vec{S}$  et donne par la formule suivant :

$$\Phi = \frac{E_1}{K_f \cdot K_{enl} \cdot f \cdot w_1} \quad (\text{IV.12})$$

$K_f = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \simeq 1.11$  (cas où le champ magnétique sous la forme sinusoïdal)

**IV. 8. 8. L'induction dans l'entrefer**

L'induction dans l'entrefer est d'une importance fondamentale dans le dimensionnement des machines électriques tournantes. Elle caractérise l'utilisation électrique de la machine. Il est donc intéressant d'utiliser des valeurs aussi élevées que possible, malheureusement on est limité par les propriétés des matériaux actifs utilisés. Sa valeur généralement comprise entre 0.7 et 1.1 Tesla.

Elle donnée par l'expression suivant :

$$B_{\delta} = \frac{0.225 \cdot 2p \cdot U_1 \cdot 10^6}{L_1 \cdot D_1 \cdot w_1} \quad (\text{IV.13})$$

#### IV. 8. 9. Le courant nominal de la machine

Le courant nominal dans une phase statorique est donné par l'expression suivante :

$$I_n = \frac{P_n 10^3}{m_1 U_1 \eta \cos \varphi} \quad (IV.14)$$

#### IV. 8. 10. Charge linéaire

La charge linéaire est le nombre d'ampères par mètre sur la périphérie d'induit. Elle caractérise l'utilisation électrique de la machine, elle est donnée en fonction du diamètre extérieur de la machine

$$A_l = \frac{I_n 2 m_1 w_1}{D_1 \pi} \quad (IV.15)$$

#### IV. 8. 11. La résistance d'une phase statorique

Le matériau utilisé dans l'enroulement statorique est le cuivre (Cu). La résistance d'une phase statorique est donnée par la relation suivante :

$$R_1 = \rho_{cu} 2 \frac{w_1 L w_1 10^3}{a_1 q_{eff}} \quad (IV.16)$$

$$L_{w_1} = 2 (L_i + L_{f1}) \quad (IV.17)$$

Ou

$$L_{f1} = (1.16 + 0.14P) b_{1moy} + 15 \quad (IV.18)$$

$$b_{1moy} = \frac{\pi(D_1 + h_{z1})}{Z_1} y_{1moy} \quad (IV.19)$$

$$y_{1moy} = \frac{Z_1}{2P} \quad (IV.20)$$

Avec :  $\beta = \frac{7}{9}$

#### IV. 8. 12. L'inductance statorique

L'inductance statorique est donnée par la formule suivant :

$$L_1 = \frac{X_1}{2 \pi f} \quad (IV.21)$$

Ou

$$X_1 = \frac{1.58 f I_n w_1^2}{p q_1 10^8} (\lambda_{if1} + \lambda_{id1} + \lambda_{encl}) \quad (IV.22)$$

$$\lambda_{if1} = \frac{0.34 q_1}{L_i} (L_{f1} - 0.64 \theta_r \frac{\pi D_1}{2p}) \quad (IV.23)$$

$$\lambda_{id1} = \left( \frac{0.33 \times 2}{\pi} \right) \times \left( \frac{\pi D_1}{2p} \right) \times \left( \frac{0.9}{\delta_{Kc} q_1} \right) \quad (IV.24)$$

$$\lambda_{enc1} = \frac{h_1}{3b_{enc1}} K_{B1} + \left[ \frac{h_{11}}{b_{enc1}} + \frac{3h_{k1}}{b_{enc1}+2b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right] K_{B1} \quad (IV.25)$$

Ou

$K_{B1} = K_{B2} = 1$  (pour un enroulement concentrique) ;  $K_c = 1.01$

$$K_{f1} = 1 - \left( \frac{0.033}{\delta t_1} b_{f1}^2 \right) \quad (IV.26)$$

$$t_1 = \frac{\pi D_1}{Z_1} \quad (IV.27)$$

$$h_1 = h_{enc1} - (h_{f1} + h_{k1}) \quad (IV.28)$$

$$h_{11} = h_{enc1} - h_1 \quad (IV.29)$$

**IV. 9. Application numérique**

Paramètres	Valeur	Unité
$P_{em}$	17.738	KW
$E_1$	207.846	Volt
$K_{d1}$	0.959	-
$K_{r1}$	0.939	-
$K_{ob}$	0.994	-
$K_{en1}$	0.895	-
$L_{w1}$	720.311	mm
$\Phi$	0.058	Wb
$B_{\delta}$	0.982	Tesla
$I_n$	28.448	A
$A_1$	$2.595 \cdot 10^4$	A/m
$R_1$	0.673	$\Omega$
$L_{f1}$	193.171	mm
$b_{1moy}$	134.143	mm
$y_{1moy}$	9	encoche
$L_1$	0.7	m H
$h_1$	15.005	mm
$h_{11}$	0.004	mm
$K_{f1}$	0.890	mm
$mt_1$	13.511	-

**Tableau IV. 3 : Application numérique des paramètres électromagnétique**

## IV. 10. Comparaison entre les valeurs calculées, mesurées et simulées

Résultats		Valeur mesuré	Valeur calculé	Valeur de simulation
Courant (A)	A vide	11.44	-	12.40
	En charge	29	28.44	30.45
Résistance ( $\Omega$ )		0.66	0.67	0.63
Inductance (m H)		-	0.7	0.6
Inertie ( $\text{Kg.m}^2$ )		0.070	-	0.074
Couple (N.m)		97.27	-	97.90

Tableau IV. 4 : Comparaison entre les valeurs calculées, mesurées et simulées.

Les résultats numériques obtenus montrent une très bonne concordance avec les résultats de mesures effectués sur la machine réelle au niveau d'Electro-Industrie.

## IV. 11. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons effectué la simulation par la méthode des éléments finis d'un moteur de 15 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 œuvre, la modélisation et le calcul du moteur à induction ne sont pas des choses aisées.

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

Nous avons, au cours de ce travail, abordé la modélisation par éléments finis 2D d'un moteur asynchrone de 15 kW fabriqué par l'entreprise nationale Electro-Industries d'Azazga. Cette méthode intégrée dans le logiciel de C.A.O Ansys- Maxwell résout de gros problèmes inhérents à l'activité de conception (prédiction des performances, limitation du nombre de prototypes,...) des moteurs asynchrone, en permettant à l'utilisateur de modifier les différents paramètres de la machine.

En effet nous avons simulé ledit moteur pour des régimes de fonctionnement à vide et en charge afin d'obtenir ses caractéristiques électromécaniques. Par la suite, nous avons effectué une validation moyennant la méthode de LIWSCHITZ pour le calcul d'un certain nombre de paramètres électriques.

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

Comme perspectives de ce travail, nous proposons :

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

# *Bibliographie*

## Bibliographie

- [1] G. Bouchard, R.P. Olivier, « Conception de moteurs asynchrones triphasés », édition de l'école polytechnique de Montréal, 1997.
- [2] R. Redjem, « Calcul et Conception Assistée par Ordinateur des Machines Electriques, Application aux moteurs asynchrones », Mémoire de Magister, Constantine, 2006.
- [3] F.Bitam 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] T. Tayebi N. Tadbirt, « Les machines industriels et les étapes de la fabrication des pièces mécanique de la machine tournante », Rapport de Stage Electro-Industries, Azazga, 2018.
- [5] C.Birouche, N Kichou « dimensionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil », Mémoire d'ingénieur, Tizi Ouzou, 2013.
- [6] W. Degaïchia, «Conception et dimensionnement des moteurs asynchrones de petite et moyenne puissances», Thèse de Doctorat de, Lausanne, 2001.
- [7] R. Abdessemed, « Electrotechnique - Les enroulements des machines électriques, Différents types, spécificités, conception, placement », Ellipses, 2012.
- [8] A É. Perret, « Contribution à la conception de moteurs électriques assistée par ordinateur », Thèse de Doctorat, Lausanne, 1984.
- [9] M. Kostenko, L. Piotrovski, « Machines électriques » tome II, Editions Mir, 1969
- [10] T.Wildy, G.Sybille, «Electrotechnique 4eme édition », De Boeck, Paris, 2005
- [11] J.Chatelain, « Machines électriques», Dunod, Paris, 1986.
- [12] R. Merad, « outils de diagnostic appliques a la machine asynchrone triphasée a cage d'écureuil », Mémoire de Magister, Constantine, 2005/2006.
- [13] G. Segulier, F. Nottelet, « Electrotechnique industrielle », Tec et Doc-Lavoisier, 1996.
- [14] G. Spinnler, « Conception des machines, principe et applications », Lausanne, 1998
- [15] C. Chevassu, « Généralités sur les machines électriques tournantes », O1MM 2e année, version de septembre 2012.

[16] H. Gie, J. P. Sarmant, « Electromagnétisme 2 », Lavoisier, Paris 1982.

[17] Y B. N'guessan J. Luc, « Méthode des Eléments Finis Mixtes et Conditions Aux Limites Absorbantes Pour la Modélisation des Phénomènes Electromagnétiques Hyperfréquences », Thèse de Doctorat, L'école Doctorat de Lyon, 1995.

[18] C. Sabonnadière, L. Coulomb, «Calcul des champs électromagnétiques», Technique de l'ingénieur, D 3020.

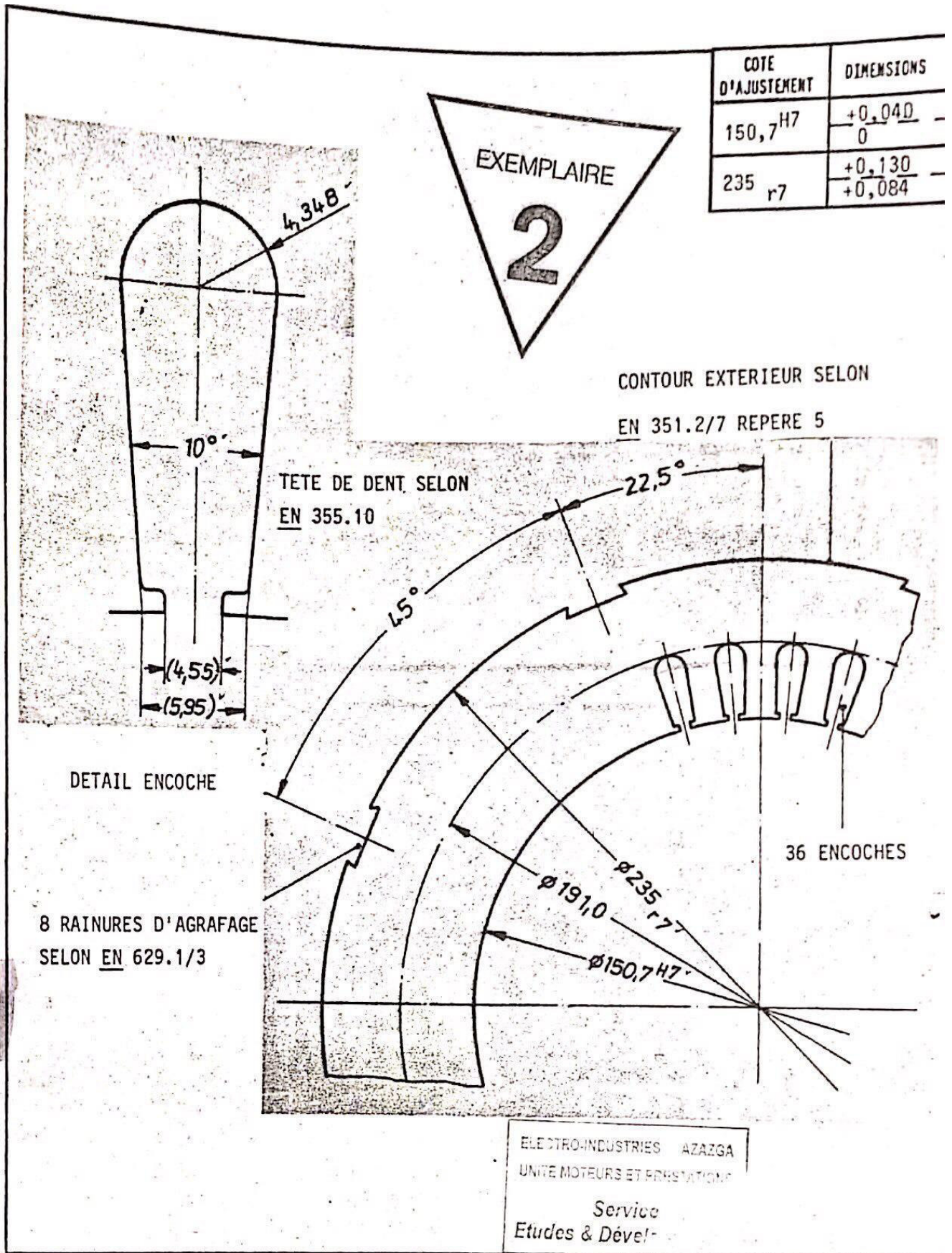
[19] Y. Choua, « Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault », thèse doctorat, Paris, 2009.

[20] 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 Docteur ingénieur, conservatoire national des Arts et Métiers (CNAM), Université de Paris VI, Janvier, 1981.

[21] B. Boualem, F. Piriou, « Numerical Models for Rotor Cage Induction Machines Using Finite Element Method », IEEE Transactions on Magnetics, 1998

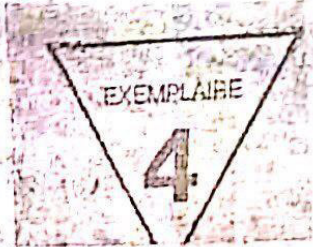
# *Annexes*

# Annexes 1



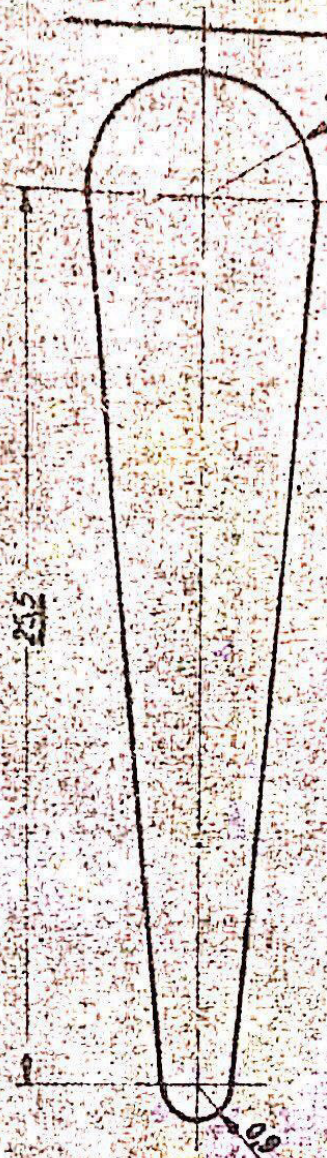
# Annexes 2

ENCOCHE D'EMPILAGE SELON EN 355.01//

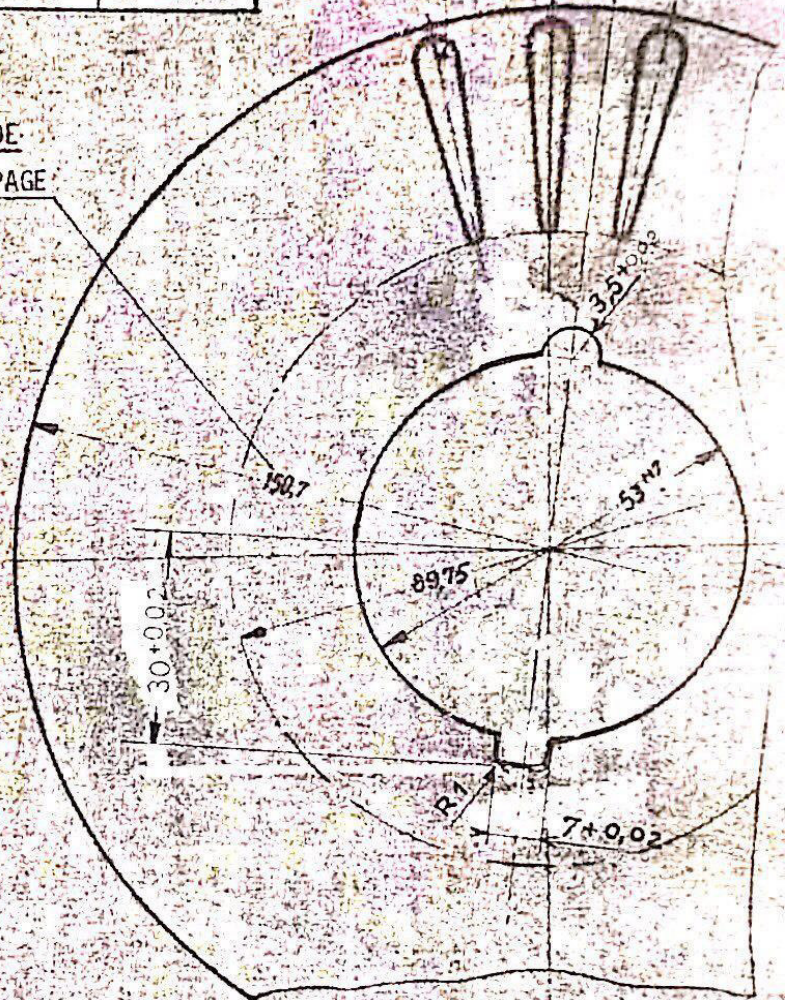


COTE D'AJUSTEMENT	DIMENSIONS
53 <sup>H7</sup>	$\frac{+0,030}{0}$

28 ENCOCHES



COTE DE  
DECOUPAGE



## Résumé

Dans ce travail nous avons fait une étude générale sur la construction des machines asynchrones à cage d'écureuil ainsi une conception assistés par ordinateur sous environnement de logiciel d'électromagnétisme « Ansys-Maxwell ». Dans ce contexte, une modélisation numérique de cette machine est réalisée selon une approche numérique par la méthode des éléments finis. Ensuite nous avons visualisé le comportement à vide et en charge et calculé quelque paramètres électromagnétiques par la méthode LIWSCHITZ. D'après les résultats obtenus on constate que ces derniers concordent bien celle de l'entreprise qu'on a effectué notre stage pratique.

## ملخص

في هذا العمل قمنا ب دراسة عامة حول تركيب المحركات اللاآزامنية ذات قفص السنجاب كما تطرقنا الى تصميمها بمساعدة الكمبيوتر تحت بيئة البرمجيات " انسيس ماكسوال " المتخصص في الظواهر الكهرومغناطيسية. وفي هذا السياق قمنا بنمذجة هذا الأخير بطريقة العناصر المحددة ثم رأينا سلوك المحرك بدون حمولة وبحمولة. بعدها قمنا بحساب بعض المقادير الكهرومغناطيسية. بعد النتائج المتحصل عليها استنتجنا ان هذا الأخير تتطابق مع المعطيات المأخوذة من المؤسسة المجرى فيها التدريب العملي