



Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique
Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Electrotechnique industrielle

Réalisé par :

ASSAM Sedik

Thème

Etude et simulation de l'influence de l'entrefer et des différents types de bobinage sur les performances globales d'un moteur asynchrone triphasé à cage *EI*

Soutenu le : **06/07/2021**

Devant la commission composée de :

Mme. KIRECHE Nora	M.C.B	Univ. Bouira	Président
Mr. BOUZIDA Ahcene	M.C.A	Univ. Bouira	Examineur
Mr. BENSAID Samir	Pr.	Univ. Bouira	Encadreur
Mme. HADJAZ Sadia	Ingénieure	Electro- Industries	Co-encadreur

Remerciement

Avant tout je tiens à remercier Dieu, le tout puissant et miséricordieux qui m'a donné la force, la volonté et la patience d'accomplir ce modeste travail.

D'après Abou Soureira (qu'Allah l'agrée), le prophète Mohamed (que la bénédiction et paix d'Allah soient sur lui) a dit :<< celui qui ne remercie pas les gens n'a pas remercié Allah>>.

(Rapporté par Abou Daoud dans son Sounan n° 4811)

Je tiens à exprimer, mes vifs remerciements à mon encadreur, Mr BENSAD Samir professeur à l'université Bouira pour m'avoir proposé ce thème, pour son suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire et pour ses précieux conseils.

Egalement, je tiens à remercier ma Co-promotrice : Mme SADJA Sadia ingénieure à l'entreprise Electro-Industries Azazga pour son aide et de m'avoir accompagné tout au long de stage au sein de l'entreprise

J'adresse mes vifs remerciements au président du jury : Mme KRECHE Nora ainsi qu'à l'examineur : Mr BOUZIDA Abcene pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail.

Je saisis aussi cette occasion pour remercier tous les enseignants du département Génie Electrique ayant contribué à ma formation durant les deux cycles de Licence et Master. Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicace

Du profond de mon cœur, je dédie ce modeste travail :

À ma très chère mère

À mon très cher père

À mes sœurs et frères

À tous mes amis surtout :

**Yacine, Abi Bakr, Abdelkader, Mohamad, Massoud et
Bilal**

INTRODUCTION GENERALE **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

CHAPITRE I : GENERALITE SUE LE MOTEUR ASYNCHRONE

I.1 INTRODUCTION **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

I.2 CONSTITUTION DU MOTEUR ASYNCHRONE A CAGE **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

I.2.1 Le stator **Erreur ! Signet non défini.**

I.2.1.1 Rotor bobiné ou à bagues : **Erreur ! Signet non défini.**

I.2.1.2 Rotor à cage **Erreur ! Signet non défini.**

I.2.1.3 Rotor à double cage **Erreur ! Signet non défini.**

I.2.2 L'entrefer **Erreur ! Signet non défini.**

I.2.3 Les organes mécaniques **Erreur ! Signet non défini.**

I.3 GRANDEURS PRINCIPALES DES MOTEURS ASYNCHRONES : **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

I.3.1 Vitesse de synchronisme ou vitesse du champ glissant..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.3.2 Glissement **Erreur ! Signet non défini.**

I.3.3 Puissance absorbés..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.3.4 Facteur de puissance **Erreur ! Signet non défini.**

I.3.5 Puissance utile **Erreur ! Signet non défini.**

I.3.6 Rendement **Erreur ! Signet non défini.**

I.4 CARACTERISTIQUE ELECTROMECHANIQUE : **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

I.4.1 Caractéristique du couple $C=f(g)$: **Erreur ! Signet non défini.**

I.4.2 Caractéristique du courant $I=f(g)$: **Erreur ! Signet non défini.**

I.5 BOBINAGE DES MACHINES ASYNCHRONES : **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

I.5.1 Rappel sur les paramètres des enroulements **Erreur ! Signet non défini.**

I.5.1.1 Bobinages à pas diamétral : **Erreur ! Signet non défini.**

I.5.1.2 Bobinages à pas raccourci : **Erreur ! Signet non défini.**

I.5.1.3 Bobinages à pas allongé : **Erreur ! Signet non défini.**

I.6 INFLUENCE DU BOBINAGE SUR LA FORME D'ONDE DE LA F.M.M..... **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

I.6.1 Enroulement diamétral..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.6.2 Enroulement réparti **Erreur ! Signet non défini.**

I.6.3 Raccourcissement des bobines **Erreur ! Signet non défini.**

I.6.4 Coefficient de bobinage K_{bh} **Erreur ! Signet non défini.**

I.6.4.1 Coefficient de raccourcissement : **Erreur ! Signet non défini.**

I.7 SCHEMAS DE BOBINAGE **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

I.8 ENROULEMENTS A UNE OU DEUX COUCHES..... **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

I.8.1 Enroulements à simple couche **Erreur ! Signet non défini.**

I.8.2 Enroulements à double couche **Erreur ! Signet non défini.**

I.9 LES DIFFERENT TYPES D'ENROULEMENT TRIPHASE :	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
I.9.1 Enroulements imbriqués à une seule couche :	Erreur ! Signet non défini.
I.9.2 Enroulements imbriqués à deux couches :	Erreur ! Signet non défini.
I.9.3 Enroulement concentrique à une couche :	Erreur ! Signet non défini.
I.9.4 Enroulement concentrique à deux couches :	Erreur ! Signet non défini.
I.9.5 Enroulement triphasé à nombre fractionnaire d'encoches par pôle par phase ...	Erreur ! Signet non défini.
I.10 CONCLUSION :	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.

CHAPITRE II : SIMULATION DU MOTEUR ASYNCHRONE A CAGE

II.1 INTRODUCTION	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.2 PRESENTATION DU LOGICIEL FLUX2D :	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.3 PROCESSUS D'ELABORATION D'UN PROJET FLUX2D	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.3.1 Préparation des données liées au problème étudié et choix du type de simulation.....	Erreur ! Signet non défini.
II.3.2 Description géométrique :	Erreur ! Signet non défini.
II.3.3 Génération du maillage :	Erreur ! Signet non défini.
II.3.4 Description physique	Erreur ! Signet non défini.
II.3.5 Résolution.....	Erreur ! Signet non défini.
II.3.6 Exploitation des résultats.....	Erreur ! Signet non défini.
II.4 MODELE 2D MAGNETO HARMONIQUE.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.4.1 Couplage du circuit du rotor :	Erreur ! Signet non défini.
II.4.2 Formule du circuit statorique	Erreur ! Signet non défini.
II.5 MODELE 2D MAGNETIQUE-TRANSITOIRE :	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.6 LES DONNEES DE LA MACHINE ETUDIEE.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.7 CONFIGURATION DES ENROULEMENTS STATORIQUES	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.8 PROCEDURE DE SIMULATION DU MOTEUR 280-2 DANS FLUX 2D.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.8.1 Implémentation de la géométrie et maillage	Erreur ! Signet non défini.
II.8.2 Description Physique.....	Erreur ! Signet non défini.
II.8.3 Couplage élément finis – circuit électrique	Erreur ! Signet non défini.
II.8.3.1 Calcul les paramètres du circuit :	Erreur ! Signet non défini.
II.8.3.2 Interprétation du circuit :	Erreur ! Signet non défini.
II.8.4 Résolution et exploitation des résultats :	
En régime magnéto-hamonique :	Erreur ! Signet non défini.
II.8.4.1 Variation du potentiel magnétique au long de l'entrefer :	Erreur ! Signet non défini.
II.8.4.2 Comparaison des résultats :	Erreur ! Signet non défini.

II.9 CONCLUSION : **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

CHAPITRE III : SIMULATION ET ETUDE DE L'INFLUENCE DE L'ENTREFER ET ET LES DIFFERENTS BOBINAGES

III.1 INTRODUCTION..... **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

III.2 SIMULATION DU MOTEUR 280-2 EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DE L'ENTREFER : **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

III.2.1 Variation de la valeur de l'entrefer à vitesse nominale..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.2.2 Variation de la vitesse du moteur à différentes valeurs de l'entrefer..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.3 SIMULATION EN REGIME TRANSITOIRE **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

III.4 CONFIGURATIONS ETUDIÉES DU BOBINAGE POUR LE MOTEUR 280-2 **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

III.4.1 Bobinage concentrique..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.4.2 Bobinage concentrique ondulé 2 par 3..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.4.3 Bobinage imbriqué sans raccourcissement (diamétral) **Erreur ! Signet non défini.**

III.4.4 Bobinage imbriqué raccourci **Erreur ! Signet non défini.**

III.4.5 Bobinage concentrique simple-double **Erreur ! Signet non défini.**

III.5 RESULTATS DE SIMULATION DES TYPES ET CONFIGURATIONS DE BOBINAGE : **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

III.6 CONCLUSION..... **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

CONCLUSION GENERALE **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

Liste des figures

Figure I. 1 : Eléments de la constitution d'une machine asynchrone à cage [13].....	3
Figure I. 2: Stator d'un moteur asynchrone.....	4
Figure I. 3 : Rotor d'un moteur asynchrone (a) bobiné (b)à cage [12]	5
Figure I. 4: Rotor à double cage [5]	5
Figure I. 5 : Vue éclatée d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil [6]	6
Figure I. 6 : caractéristique mécanique d'un moteur asynchrone à cage.....	8
Figure I. 7 : caractéristique électrique d'un moteur asynchrone à cage.....	8
Figure I. 8: Bobine diamétrale.....	10
Figure I. 9 : F.m.m d'une phase en fonction de l'angle.	10
Figure I. 10 : bobines diamétrales réparties.....	11
Figure I. 11 : F.m.m des bobines réparties.....	12
Figure I. 12 : Raccourcissement d'un pas dentaire pour un stator à 2 encoches par.....	12
Figure I. 13 : Fmm par phase du bobinage de la FigureI.17.....	13
Figure I. 14 : bobinage concentrique du moteur asynchrone triphasé à cage :(a) à une couche à pas diamétral, (b) double couche à pas raccourci 5/6.	15
Figure I. 15 : la distribution du potentiel vecteur : (a)enroulement concentrique à une couche, (b) enroulement concentrique double couche à pas raccourci.....	15
Figure I. 16 : le spectre des harmoniques.....	16
Figure I. 17 : Schémas de bobinage.....	17
Figure I. 18: Enroulement imbriqué triphasé pour les trois phases à 4 pôles, 24 encoches.	18
Figure I. 19: Enroulement concentrique monocouche triphasé pour les trois phases à 2 pôles, 24 encoches.....	19
Figure I. 20: Enroulement concentrique double couches triphasé pour les trois phases à 4 pôles, 24 encoches.	19
Figure I. 1: Enroulement concentrique à nombre fractionnaire d'encoches par pôle par phase.....	20
Figure II. 1: Enchaînement des étapes d'un projet Flux2d.....	21
Figure II. 2 : Schéma de bobinage développé du moteur étudié.....	25
Figure II. 3 : Modèle géométrique du moteur asynchrone 280-2.....	26
Figure II. 4: Schéma de bobinage circulaire du moteur 280-2.....	27
Figure II. 5 : Maillage de la machine entière et au tour de l'entrefer.....	28
Figure II. 6 : Courbe d'alimentation du matériau magnétique.....	29

Liste des figures

Figure II. 7 : Circuit équivalent de la cage d'écureuil.....	30
Figure II. 8: Paramétrage de l'anneau.....	30
Figure II. 9: Circuit équivalent de couplage.....	32
Figure II. 10: Représentation de la répartition :(a) induction magnétique, (b) vecteur potentiel.....	33
Figure II. 11: Le potentiel vecteur magnétique et leurs harmoniques.....	34
Figure II. 12: Le couple en fonction du glissement.....	34
Figure II. 13: courant de phase en fonction du glissement.....	35
Figure II. 14: Puissance active absorbé en fonction du glissement.....	35
Figure II. 15: Facteur de puissance en fonction du glissement.....	35
Figure II. 16 : Le rendement du moteur en fonction du glissement	36
Figure III. 1: Répartitions de l'induction magnétique (gauche) et du potentiel vecteur magnétique (droite)	39
Figure III. 2: Partie réelle du potentiel vecteur magnétique le long de l'entrefer.....	39
Figure III. 3: Evolution du couple électromagnétique en fonction de l'épaisseur de l'entrefer.....	40
Figure III. 4: Evolution du facteur puissance en fonction de l'entrefer.....	41
Figure III. 5: Evolution du courant de phase en fonction de l'entrefer.....	41
Figure III. 6: Evolution du rendement en fonction de l'entrefer.....	41
Figure III. 7: Evolution des puissances active, réactive et apparente en fonction de l'entrefer.....	42
Figure III. 8: L'évolution des couples électromagnétiques en fonction du glissement pour plusieurs valeurs de l'entrefer	43
Figure III. 9: L'évolution des courants en fonction du glissement pour plusieurs valeurs de l'entrefer.....	43
Figure III. 10: L'évolution des puissances absorbées en fonction du glissement pour plusieurs valeurs de l'entrefer.....	43
Figure III. 11: L'évolution des facteurs des puissances en fonction du glissement pour plusieurs valeurs de l'entrefer.....	44
Figure III. 12: L'évolution des rendements en fonction du glissement pour plusieurs valeurs de l'entrefer.....	44
Figure III. 13: variation des courants des phases en fonction du temps.....	45
Figure III. 14: Bobinage concentrique :(a) schéma développé plan, (b) schéma circulaire	47
Figure III. 15: Bobinage concentrique ondulé 2 par 3 : :(a) schéma développé plan, (b) schéma circulaire.....	48
Figure III. 16: Bobinage imbriqué :(a) schéma développé plan, (b) schéma circulaire.....	49
Figure III. 17: Bobinage imbriqué raccourci :(a) schéma développé plan, (b) schéma circulaire.....	50

Liste des figures

Figure III. 18: Bobinage concentrique simple-double couche : (a) schéma développé plan, (b) schéma circulaire.....	51
Figure III. 19: Evolution du potentiel vecteur magnétique le long d'entrefer pour les six types des bobinage.....	52
Figure III. 20: Evolution des couples électromagnétiques en fonction du glissement pour les six configurations des bobinages.....	53
Figure III. 21: L'évolution des courants des phases en fonction du glissement pour les six configurations des bobinages	53
Figure III. 22: Evolution des puissances actives absorbées des phases en fonction du glissement pour les six configurations des bobinages.....	54
Figure III. 23: Evolution des facteurs des puissances en fonction du glissement pour les six configurations des bobinages	54
Figure III. 24: Evolution des rendements en fonction du glissement pour les six configurations des bobinages.....	54

Liste des Tableaux

Tableau II. 1: Caractéristiques du moteur 280-2 (voir Annexe c pour plus de détails)	25
Tableau II. 2: Caractéristiques des régions surfaciques.....	30
Tableau II. 3: Les valeurs des paramètres du circuit (Annexe D)	32
Tableau II. 4: Caractéristiques électriques et mécaniques du moteur.....	37
Tableau III 1: Caractéristiques et performances principales pour les cinq valeurs d'entrefer.....	44
Tableau III .2 : Caractéristiques et performances principales pour les six configurations du bobinage.....	55

Liste des symboles et abréviations

- **Symboles**

Ω_s : La vitesse de ce champ tournant est appelée la vitesse de synchronisme [rad/s].

ω_s : Pulsation électrique synchrone du champ tournant [rad/s].

p : Nombre de paires de pôles.

g : Glissement.

N_s : Vitesse de synchronisme [tr/mn].

N_r : Vitesse de rotation du rotor (tr/mn).

Ω : Vitesse de rotation du rotor [rad/s].

P_a : La puissance absorbée [W].

S : La puissance apparente (VA).

Q : La puissance réactive (VAR).

$\cos \varphi$: Le facteur de puissance.

P_u : La Puissance utile [W].

C : Couple du moteur [N.m]

η : Le rendement d'un moteur asynchrone [%].

P_{tr} : La puissance transmise au rotor [W].

P_{em} : La puissance électromagnétique [W].

P_{jr} : Les pertes joule rotorique[W].

Z : Nombre d'encoche.

m : Nombre de phase .

q : Nombre d'encoche par pole et par phase.

τ : Le pas polaire.

K_d : Coefficient de distribution.

β : Facteur de raccourcissement.

K_b : Coefficient de bobinage.

K_r : Coefficient de raccourcissement.

τ_{racc} : Le pas raccourci.

g_b : Groupe de bobine.

n_s : Nombre de section.

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide [H/m].

μ : La perméabilité relative[H/m].

\vec{A} : Potentiel vecteur magnétique [Wb/m]

Liste des symboles et abréviations

\vec{H}_c : Le champ magnétique coercitif (A/m).

σ : Est la conductivité électrique du milieu [S/m]

J : La densité de courant [A/m²]

w : La pulsation propre [rad/s].

V : Le potentiel scalaire électrique [V]

R_b : La résistance de barre [Ω]

I_i^r : Le courant de barre [A]

s_b : Le section de barre [m²]

l : La longueur de barre [m]

R_{ph} : La résistance de l'enroulement d'une phase [Ω]

L_{tet} : L'inductance du bobinage d'une phase situé dans les chignons [H]

E : La force contre-électromotrice [V]

t : Temps [s].

J_m : Le moment d'inertie de la machine [kg.m²]

f_v : Le frottement visqueux du rotor

C_{ch} : Le couple charge [N.m]

C_{em} : Le couple électromagnétique de la machine [N.m].

L_{fann} : L'inductance inter- barre [H]

p_{fann} : La perméance de fuite des anneaux.

R_{ann} : La résistance inter-barre [Ω.m]

l_{an} : Périmètre de l'anneau [m]

N_R : Nombre de barres rotoriques

ρ : Résistivité des barres [Ω.m]

s_{an} : Section de l'anneau [m²]

L_{TB} : L'inductance des têtes bobines [H]

N : Nombre de spires en séries par bobine

n : Nombre de bobines par phases

a : Nombre de chemins en parallèle

D : Diamètre moyen des spires [m]

GMD : Distance moyenne entre deux conducteurs dans l'encoche [m].

- **Abréviations**

F.m.m : la force magnétomotrice.

EF : Eléments finis

Introduction générale

Les moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil sont très utilisés dans les applications industrielles en raison de leur faible coût, leur fabrication relativement simple et leur construction robuste. Au cours de ce dernière siècle, la société moderne a évolué un développement progressif au niveau du rendement énergétique particulièrement orienté vers l'amélioration de l'efficacité énergétique du moteur asynchrone. Lors de la fabrication de ce dernier, le dimensionnement des parties magnétiques et électriques est très important. Ce dimensionnement, particulièrement la configuration des enroulements et la distribution des bobines dans les encoches statoriques, affecte directement les performances et l'efficacité énergétique du moteur asynchrone. Le dimensionnement du bobinage affecte non seulement la distribution du flux magnétique dans l'entrefer, mais également les forces électromotrices dans les enroulements.

Problématique : Quand le fournisseur d'énergie électrique Sonelgaz (Distribution) a basculé de la tension 380V à 400V, l'entreprise Electro-Industries Azazga a été contrainte de vérifier les performances de ses moteurs suite à ce changement. Plusieurs moteurs n'ont pas répondu aux standards de l'entreprise. De ce fait, des modifications qui ont touché essentiellement le bobinage, ont été effectués sur l'ensemble des moteurs fabriqués par l'entreprise. Les moteurs de petites et moyennes puissances ont bien répondu à cette modification, contrairement aux moteurs de grandes puissances à grande vitesse pour lesquels la modification a été plutôt défavorable. C'est dans ce contexte que ce projet de fin d'étude a été proposé par l'Electro-Industries en collaboration avec l'université de Bouira. Dans ce cadre j'ai effectué un stage d'un mois à l'Electro-Industries Azazga présentée en Annexe a.

Le travail présenté dans ce mémoire s'articule autour de l'étude et de la simulation d'un moteur asynchrone à cage de puissance et de vitesse élevées, fabriqué par l'électro-industries Azazga. C'est un moteur asynchrone bipolaire (3000tr/min) triphasé, double cage de 75KW. Nous allons nous intéresser particulièrement à l'étude de l'influence des différents types de bobinages et de l'entrefer sur les performances globales de ce moteur.

Le mémoire est structuré principalement sur trois chapitres :

Le premier chapitre est composé de deux parties. Nous avons commencé par une présentation des généralités sur les moteurs asynchrones, puis nous avons donné un éclaircissement détaillé sur les configurations des bobinages statoriques possibles pour les moteurs asynchrones.

Dans le deuxième chapitre est consacré à la présentation du logiciel de simulation par éléments finis Flux2d. Nous avons présenté les étapes principales à suivre pour effectuer une simulation d'un dispositif électrotechnique avec un exemple détaillé appliqué sur le moteur étudié. Ce dernier va nous permettre de valider les données géométriques et physiques fournies par l'Electro-industries Azazga. La validation consiste à confronter les résultats de simulation avec les données du catalogue.

Le dernier chapitre présente la simulation du moteur étudié pour différentes valeurs de l'entrefer et différentes structures de bobinage que nous avons proposé. L'ensemble des résultats sont comparés et commentés.

On terminera par une conclusion générale faisant sortir les résultats les plus importants et des perspectives pour faire évoluer ce travail.

Chapitre I : Généralité sur les moteurs asynchrones

I.1 Introduction

Les moteurs asynchrones triphasés sont les moteurs les plus employés, en raison de leur robustesse, leur facilité de fabrication, leur prix réduit. Pour avoir de meilleures performances en charge, les enroulements de ce type de moteur doivent être bien choisis.

Ce chapitre présente en premier lieu un rappel sur la constitution, le principe de fonctionnement et les caractéristiques principales de la machine asynchrone, puis on s'intéressera particulièrement aux différents types de bobinages statoriques.

I.2 Constitution du moteur asynchrone à cage

Les machines asynchrones comme toutes les machines tournantes sont constituées d'une partie fixe (stator), d'une partie en mouvement de rotation (rotor) et d'un vide entre ces deux parties (entrefer). La figure I.1 illustre les différents constituants de la machine asynchrone.

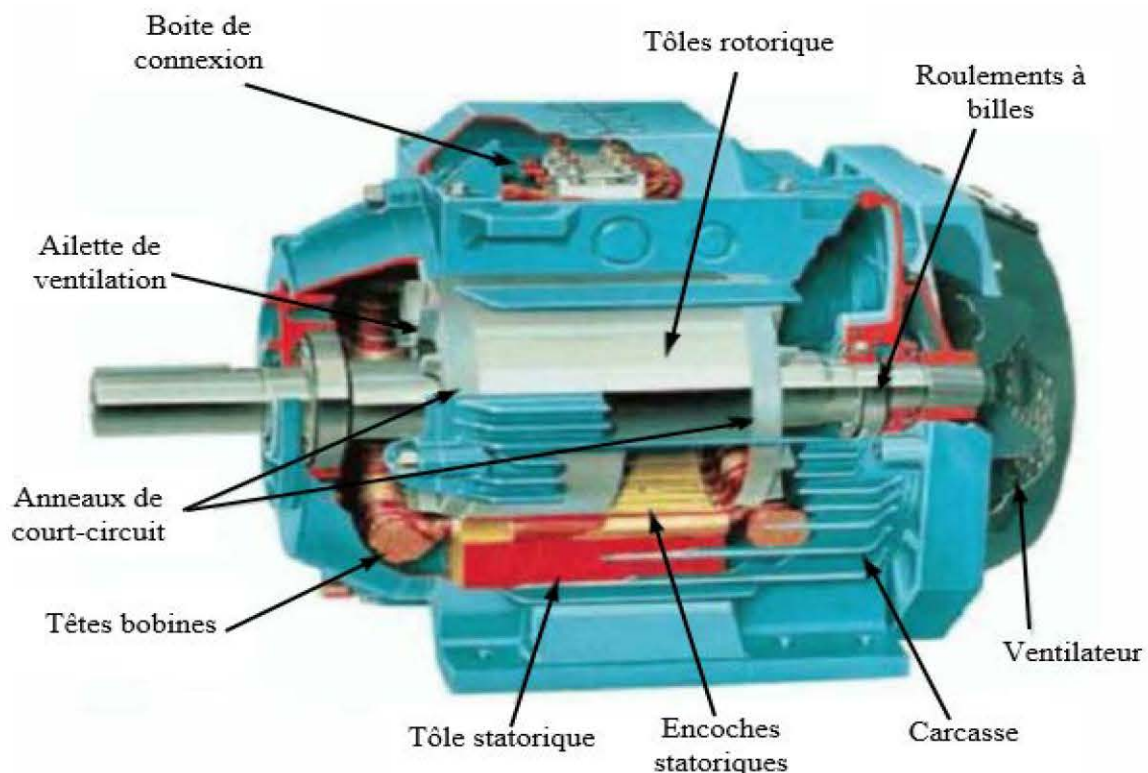


Figure I. 1 : Eléments de la constitution d'une machine asynchrone à cage [13]

I.2.1 Le stator

Le stator est la partie fixe du moteur asynchrone. Il comporte :

- Un circuit magnétique feuilleté en matériau ferromagnétique, pour minimiser les pertes par courants de Foucault dans le fer.

- Un circuit électrique constitué d'un bobinage en matériau conducteur, logé dans des encoches semi-ouvertes. Le bobinage peut être décomposé en deux parties : les conducteurs et les têtes de bobines. Les conducteurs permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant leur circulation. Le meilleur bobinage est celui qui permet d'avoir une répartition purement sinusoïdale de la force magnétomotrice (F.m.m) dans l'entrefer pour limiter les oscillations du couple électromagnétique. [13]

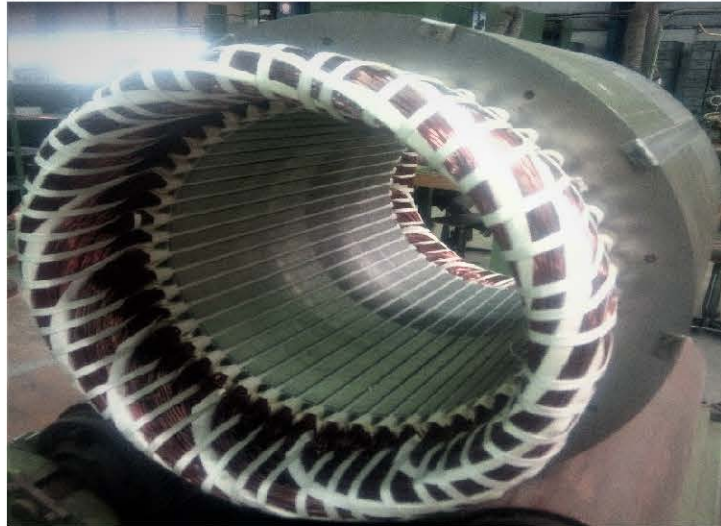


Figure I. 2: Stator d'un moteur asynchrone

I.1.1 Le rotor

Le rotor est la partie tournante du moteur asynchrone. Il est constitué comme le stator, de :

- Un circuit magnétique feuilleté en matériau ferromagnétique.
- Un circuit électrique constitué d'un bobinage court-circuité, en matériau conducteur.

En fonction du circuit électrique rotorique on peut classer le moteur asynchrone en deux principales catégories :

I.2.1.1 Rotor bobiné ou à bagues :

Le rotor comprend un enroulement bobiné logé dans des encoches semi-ouvertes. L'extrémité de chaque enroulement est reliée à une bague tournant avec l'arbre. Ces bagues permettent, par l'intermédiaire de trois balais d'insérer des éléments de circuits complémentaires (résistances, électroniques de puissance), pour l'objectif de réglage de la caractéristique couple vitesse et surtout pour le démarrage du moteur.

I.2.1.2 Rotor à cage

Les encoches peuvent être semi-ouvertes ou fermées. Les enroulements sont constitués de barres court-circuitées en cuivre pour les moteurs de forte puissance, ou en alliage d'aluminium pour les moteurs de faible et moyenne puissance. Ces barres sont court-circuitées par un anneau en aluminium ou en cuivre

[2]. Généralement il n'a pas d'isolation entre les barres et les tôles magnétiques. Leur résistance est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas dans les tôles, sauf lorsqu'il y a une rupture de barres. La majorité des moteurs sont à cage.

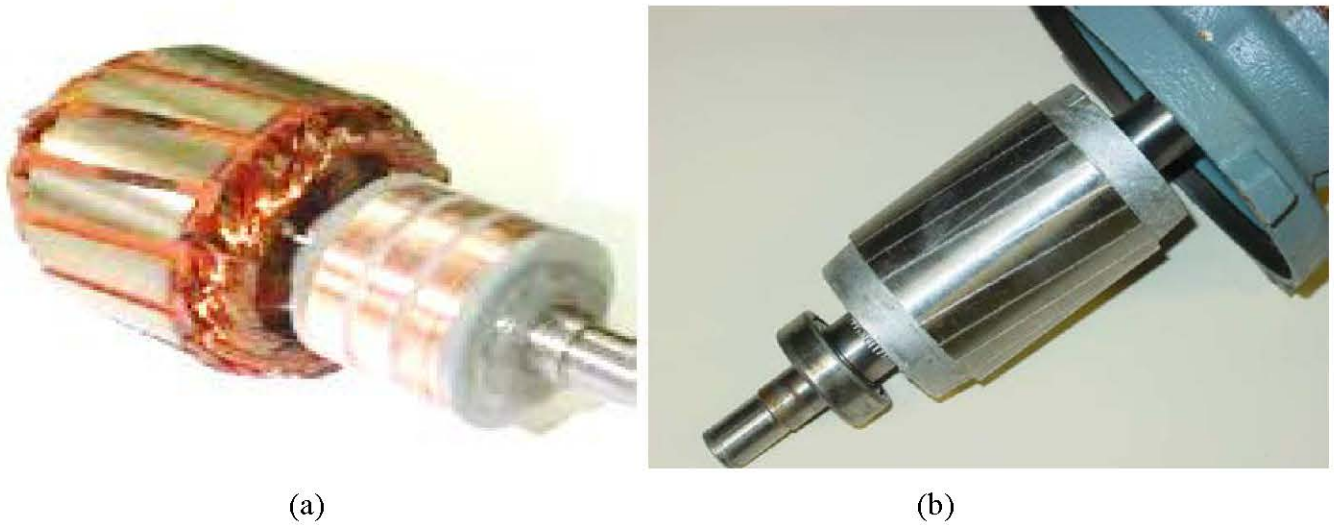


Figure I. 3 : Rotor d'un moteur asynchrone (a) bobiné (b) à cage [12]

I.2.1.3 Rotor à double cage

Le rotor est constitué de deux cages séparées. Une cage externe à la périphérie du rotor composée de matériaux résistifs (laiton, bronze) et possède une faible réactance de fuites. Une cage interne en cuivre possède une résistivité plus faible et une réactance importante de fuites. [5]

Les extrémités des barres supérieures et inférieures sont reliées par les anneaux de court-circuit qui peuvent séparés ou non Le plus répondu sont les anneaux séparés.

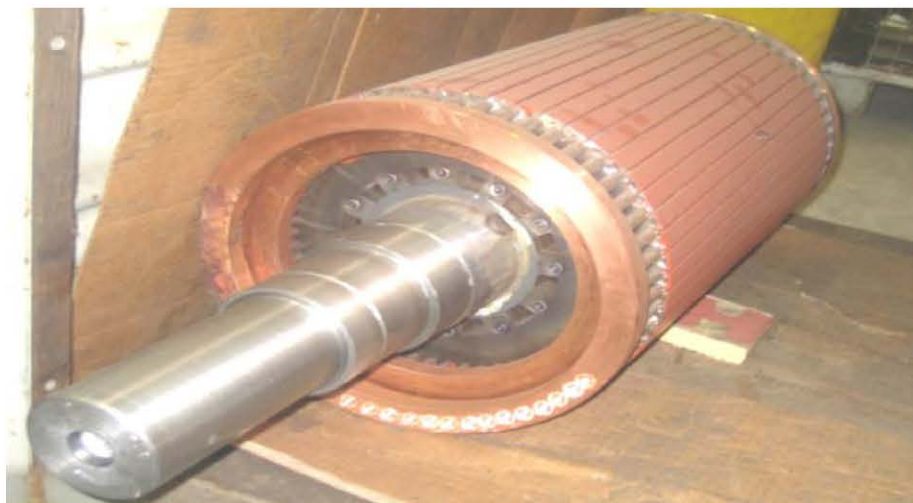


Figure I. 4: Rotor à double cage [5]

I.2.2 L'entrefer

L'entrefer est une partie amagnétique ou non saturable, constitué d'un vide entre le stator et le rotor à très faible distance (généralement entre 0.2 et 1.6 m.). La forme d'onde de la F.m.m est distordue, à cause des

harmoniques spatiales dues aux encoches, pour les réduire, les encoches sont fermées par des cales magnétiques qui maintiennent le bobinage. [6] une fois l'épaisseur de l'entrefer augmenté les pertes fer produites par la pulsation du champ magnétique sont réduits, mais le facteur de puissance aussi baisse. [9]

I.2.3 Les organes mécaniques

Le moteur possède une couverture extérieure appelé carcasse fermée de chaque côté à l'aide d'un flasque sur lequel le rotor sera positionné grâce à des roulements qui permettent la rotation de ce dernier. Dans la plupart du temps on trouve un ventilateur de refroidissement placé en bout d'arbre et couvert par capot, il contient également un bâti qui maintient les différents sous-ensembles.

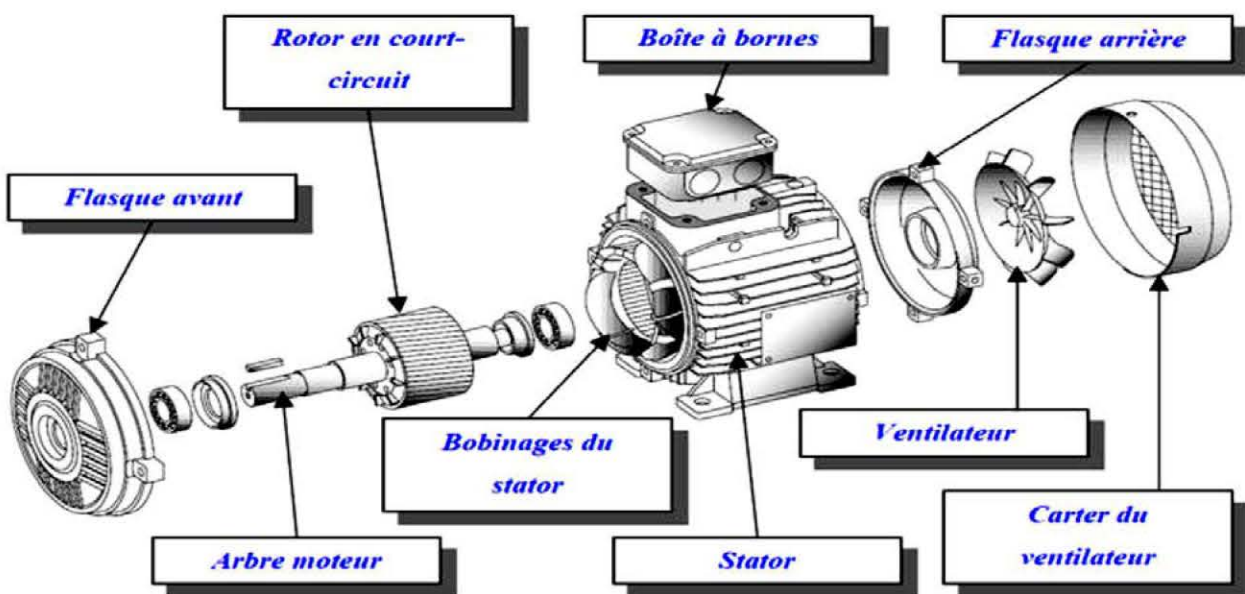


Figure I. 5 : Vue éclatée d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil [6]

I.3 Grandeurs principales des moteurs asynchrones :

I.3.1 Vitesse de synchronisme ou vitesse du champ glissant

La vitesse de ce champ tournant est appelée la vitesse de synchronisme Ω_s [rad/s]

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (I.1)$$

ω_s : Pulsation électrique synchrone du champ tournant [rad/s]

p : Nombre de paires de pôles

I.3.2 Glissement

Il est exprimé en pourcentage par l'expression suivante :

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \cdot 100 = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \cdot 100 \quad (I.2)$$

Avec :

N_s : vitesse de synchronisme (tr/mn) ;

N_r : vitesse de rotation du rotor (tr/mn) ;

Ω_s : vitesse de synchronisme (rad/s) ;

Ω : vitesse de rotation du rotor (rad/s)

I.3.3 Puissance absorbés

La puissance absorbée

$$P_a = 3V.I.\cos\varphi = \sqrt{3} U.I.\cos\varphi \quad (\text{I.3})$$

I.3.4 Facteur de puissance

Les moteurs asynchrones pour créer leurs champs électromagnétiques, ils doivent absorber une puissance réactive(Q) de la source, cette type de puissance s'exprimée en VAR et ne produit aucun travail mécanique. Ce dernier produite entièrement à partir le puissance active absorbé (P) et s'exprimée en W. La somme vectorielle pour les deux crée une puissance apparente (S) s'exprimée en VA.

$$S = \sqrt{P_a^2 + Q^2} \quad (\text{I.4})$$

Le facteur de puissance est donné par :

$$\cos\varphi = P_a/S \quad (\text{I.5})$$

I.3.5 Puissance utile

La puissance utile sur l'arbre est le produit de la vitesse rotative avec le couple mécanique.

$$P_u = C.\Omega \quad (\text{I.6})$$

C : Couple du moteur en [N.m]

I.3.6 Rendement

Le rendement d'un moteur asynchrone est la puissance de sortie sur la puissance d'entrée alors est le rapport de la puissance utile à la puissance absorbée.

$$\eta = P_u/P_a \quad (\text{I.7})$$

➤ **La puissance transmise au rotor**

$$P_{tr} = P_a - (P_{fs} + P_{js}) \quad (\text{I.8})$$

➤ **La puissance électromagnétique**

$$P_{em} = P_{tr} - (P_{fr} + P_{jr}) \quad (\text{I.9})$$

➤ **La puissance utile**

$$P_u = P_{em} - P_m \quad (\text{I.10})$$

➤ **La relation entre la puissance transmise et les pertes joule rotorique**

$$P_{jr} = g.P_{tr} \quad (\text{I.11})$$

I.4 Caractéristique électromécanique :

I.4.1 Caractéristique du couple $C=f(g)$:

Lorsque le moteur à cage alimenté par une source triphasé équilibré a fréquence fixe, à mesure qu'on augmente la charge mécanique, la vitesse est réduite progressivement. Tandis que le couple atteint la valeur crête appelé point de décrochage, la vitesse chute subitement et le moteur s'arrête.

Donc il y a une relation reliée le développement du couple par moteur et sa vitesse, mais cette relation un peu compliquée, par cause on préfère la présenter sous forme de courbe plutôt que par équation. [23]

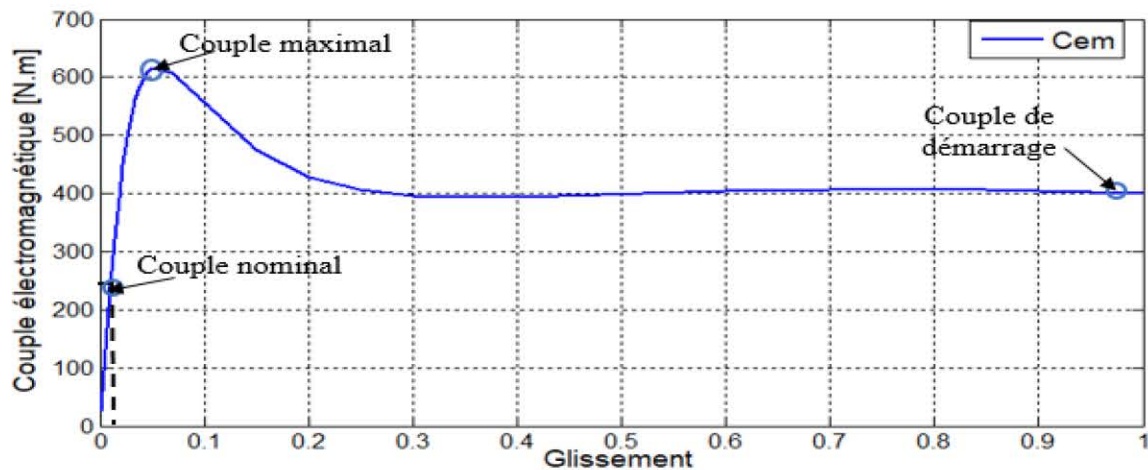


Figure I. 6 : caractéristique mécanique d'un moteur asynchrone à cage

I.4.2 Caractéristique du courant $I=f(g)$:

Lorsque le démarrage d'un moteur asynchrone. Il absorbe un fort courant, actuellement la valeur base de celui-ci peut être atteindre jusqu'à 7 ou 8 fois supérieurs à celle du courant nominal du moteur.

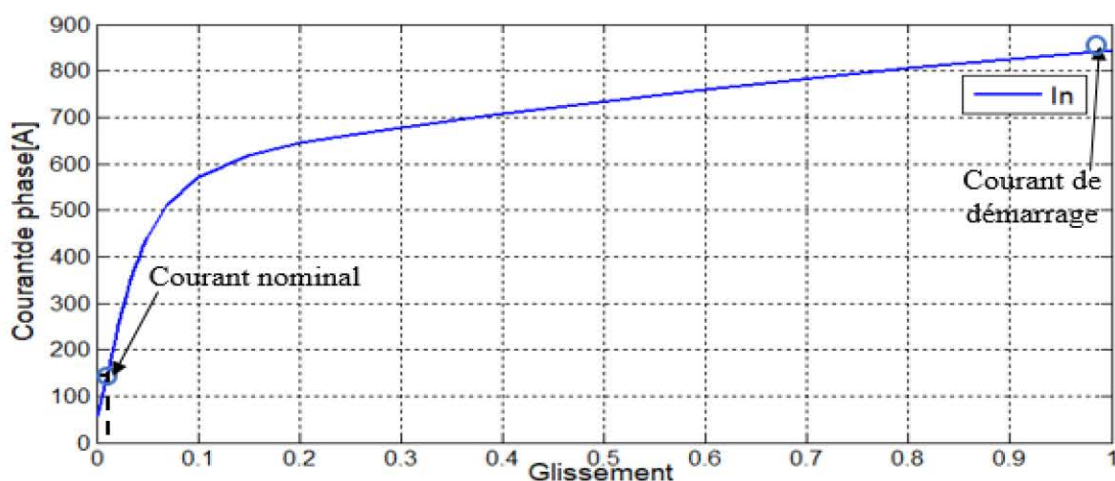


Figure I. 7 : caractéristique électrique d'un moteur asynchrone à cage

I.5 Bobinage des machines asynchrones :

Les enroulements qui produisent le champ magnétique tournant sont la partie la plus importante de la machine. En général, les enroulements sont préparés en demi bobinage ou en bobinage entier dans les machines à induction conventionnelles. Ces enroulements sont répartis dans des encoches statoriques avec les 120 degrés mécaniques pour créer le triphasé. D'un autre point de vue, ces topologies bobinées présentent des différences électriques.

I.5.1 Rappel sur les paramètres des enroulements

L'enroulement triphasé du stator est l'une des pièces maîtresses des moteurs asynchrones, les principaux processus d'échange d'énergie ont lieu dans cet enroulement. Il détermine donc essentiellement le fonctionnement du moteur. Lorsque les courants électriques, formant le système triphasé symétrique, traversent l'enroulement triphasé du moteur, ils créent un champ magnétique sinusoïdal qui se déplace dans l'espace et changent périodiquement de forme au cours du temps. [14]

Tout l'enroulement électrique est défini par les paramètres suivant : [2]

Z : nombre d'encoche

P : nombre de paires de Pôles

m : nombre de phase

q : nombre d'encoche par pôle et par phase défini par la formule suivant :

$$q = \frac{Z}{2P.m} \quad (\text{I.12})$$

Le nombre d'encoche occupé par pôle et par phase est un paramètre principal dans toutes les enroulements à courant alternatif. Il détermine le nombre de sections dans un groupe.

Les deux autres paramètres importants sont :

Le pas polaire τ défini par la formule suivant :

$$\tau = \frac{Z}{2P} = qm \quad (\text{I.13})$$

Le pas de l'enroulement y : c'est le nombre d'encoche entre deux cotés actifs

Selon la comparaison entre les deux pas précédents, on distingue trois types de bobinage :

I.5.1.1 Bobinages à pas diamétral :

Lorsque le pas d'enroulement et le pas polaire sont égaux, on trouve ces types dans le cas de bobinage concentrique monocouche, habituellement, ils sont largement utilisés dans l'industrie en raison de leur aptitude à l'insertion mécanisée ils se caractérisent comme suit :

- chaque encoche contient des conducteurs n'appartenant qu'à une seule phase ;
- toutes les encoches utilisées pour une phase sont consécutives par pôle.

I.5.1.2 Bobinages à pas raccourci :

Lorsque le pas d'enroulement inférieur à le pas polaire, grâce au degré de liberté supplémentaire qu'ils apportent, permettent d'améliorer sensiblement le taux d'harmoniques global, ou de supprimer tel ou tel harmonique particulier en adoptant le pas adéquat.

I.5.1.3 Bobinages à pas allongé :

On appelle de bobinage à pas allongé dans le cas de pas d'enroulement supérieur de pas polaire.

I.6 Influence du bobinage sur la forme d'onde de la F.m.m

Dans les machines asynchrones le calcul de la F.m.m est fait à travers la distribution de celle-ci autour de l'entrefer.

I.6.1 Enroulement diamétral

Une bobine diamétrale composée a deux conducteurs aller et retour. Ces derniers logés dans deux encoches diamétralement opposées du stator, La première encoche contient les conducteurs aller et la seconde les conducteurs retour. Cette bobine comporte n spires et est parcourue par le courant i avec le sens indiqué (sortant du plan de la feuille pour le point et entrant pour la croix), elle crée un champ magnétique se développe dans le circuit magnétique passant l'entrefer. L'association de cette bobine avec deux autre bobines des mêmes configurations et un décalage de 120° entre l'une et l'autre crée un enroulement triphasé. Le nombre des encoches statoriques égale 6. [19]

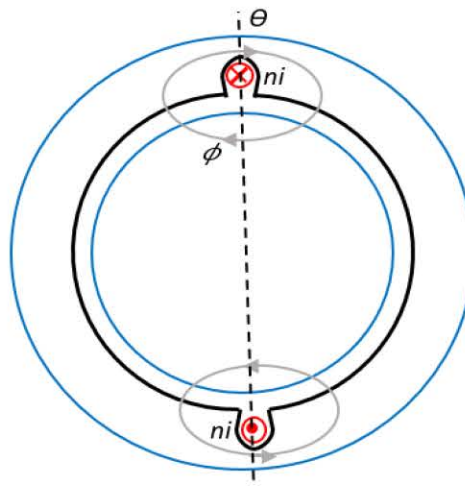


Figure I. 8: Bobine diamétrale

L'évolution de la F.m.m en le long de l'entrefer développé est sous forme rectangulaire (La Figure I.9). En négligeant l'effet d'extrémité et les ampères tours consommés par le fer devant ceux de l'entrefer.

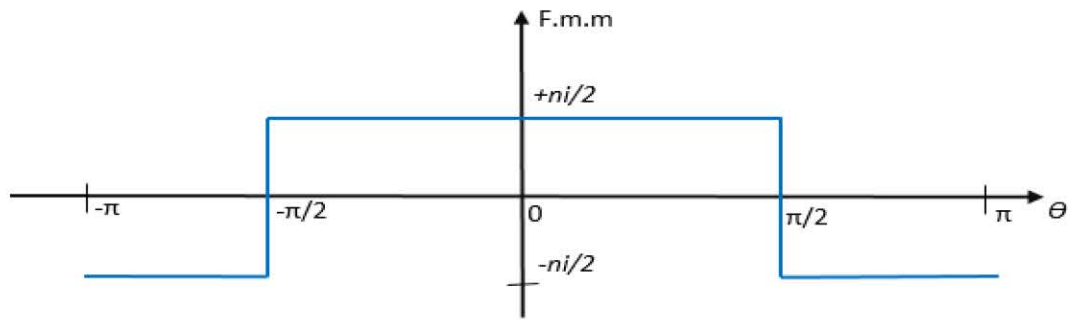


Figure I. 9 : F.m.m d'une phase en fonction de l'angle.

La décomposition en série de Fourier de la F.m.m donnée à la Figure.I.9 ne comporte que des harmoniques impaires, en prenant une origine des angles convenable, que des termes en cosinus d'où

$$F.m.m = I.(A1.cos\theta + A3.cos3\theta + \dots + Ah.cosh\theta) \tag{I.14}$$

Avec $h=2K+1$:

$$A_{2K+1} = \frac{4.n}{2.(2.k+1)} . (-1)^K \tag{I.15}$$

Afin de rapprocher un peu plus cette F.m.m sinusoïdale, on va répartir les bobines le long de l'entrefer.

I.6.2 Enroulement réparti

Dans ce cas on va répartir les bobines de $q=3$ encoches par pôles par phase (Figure I.10), Chaque encoche de la phase comporte n/q spires. D'ouverture 180° électriques, décalées deux à deux de l'écart angulaire β entre deux encoches voisines. Ceci revient à répartir les bobines sur l'espace polaire.

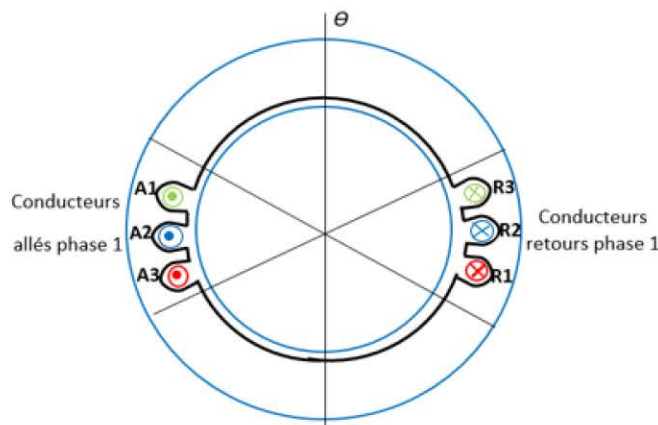
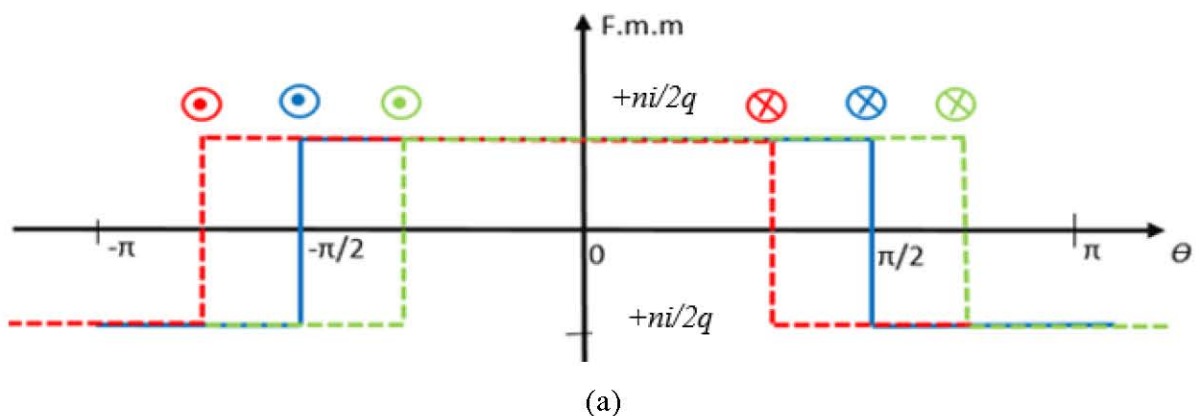


Figure I. 10 : bobines diamétrales réparties



(a)

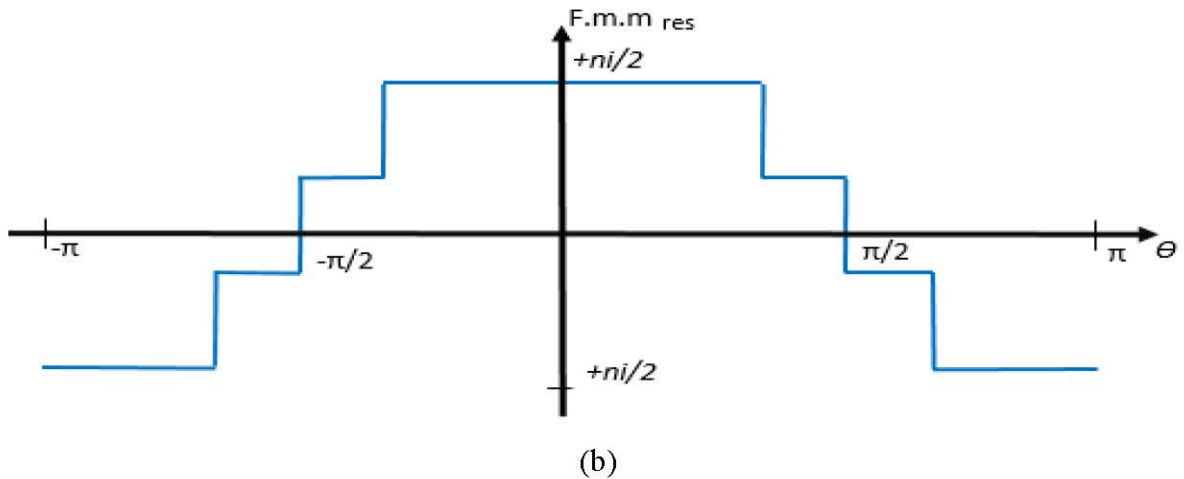


Figure I. 11 : F.m.m des bobines réparties

Ce type d'enroulement crée trois F.m.m d'amplitude ni/q décalées entre elles (Figure I.11. a). La Fmm résultante (F.m.m res) est en escalier et d'amplitude ni (Figure I.11.b).

Le fondamental et les divers harmoniques, le coefficient de distribution k_d est le rapport entre ce que donne le bobinage réel et ce que donnerait le bobinage si tous les conducteurs d'une phase pour une paire de pôles étaient regroupés dans deux encoches :

$$Kd_h = \frac{\sin(\frac{h.\pi}{6})}{q.\sin(\frac{h.\pi}{6.m})} \tag{I.16}$$

La décomposition en série de Fourier est identique à celle obtenue pour une bobine diamétrale au facteur multiplicatif Kd_h avec $h = 2k+1$ et

$$A_{2K+1} = \frac{4.n}{2.(2.k+1)} . (-1)^K . Kd_{2k+1} \tag{I.17}$$

I.6.3 Raccourcissement des bobines

Les bobines traitées précédemment sont des bobines diamétrales : leur ouverture était de 180° . L'autre catégorie la plus trouvable est un pas raccourci signifie que l'ouverture des bobines est inférieure à 180° : il vaut $180^\circ * \beta$ où β est le facteur de raccourcissement, dans notre cas on choisit $\beta = 5/6$ (Figure I.12). Il est à noter que le raccourcissement est toujours un multiple du pas dentaire. [7]

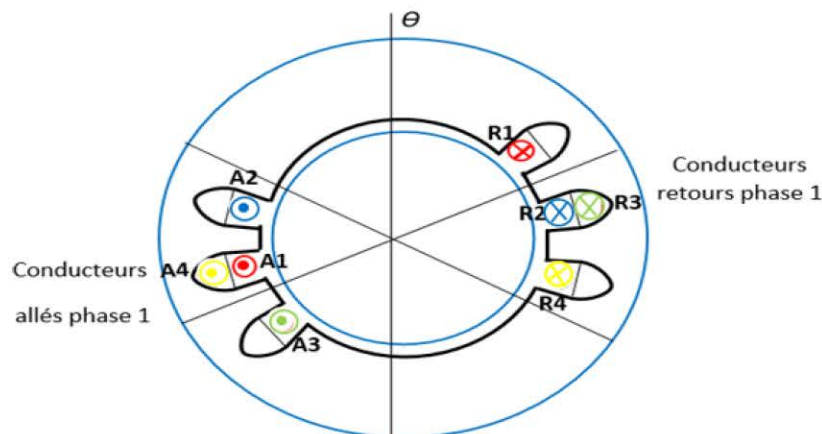


Figure I. 12 : Raccourcissement d'un pas dentaire pour un stator à 2 encoches par

On s'aperçoit que certaines encoches vont contenir deux phases différentes. Dès qu'il y a raccourcissement de pas, l'enroulement est dit à deux couches. Pour le cas de la (FigureI.14), les quatre bobines sont réparties en deux groupes de deux bobines créant deux fmm identiques mais décalées de 30° (A1R1 avec A2R2 et A3R3 avec A4R4) en trait pointillé sur la (Figure I.13.a). L'allure de la fmm résultante par phase F.mm res est donnée a la (Figure I.13.b).

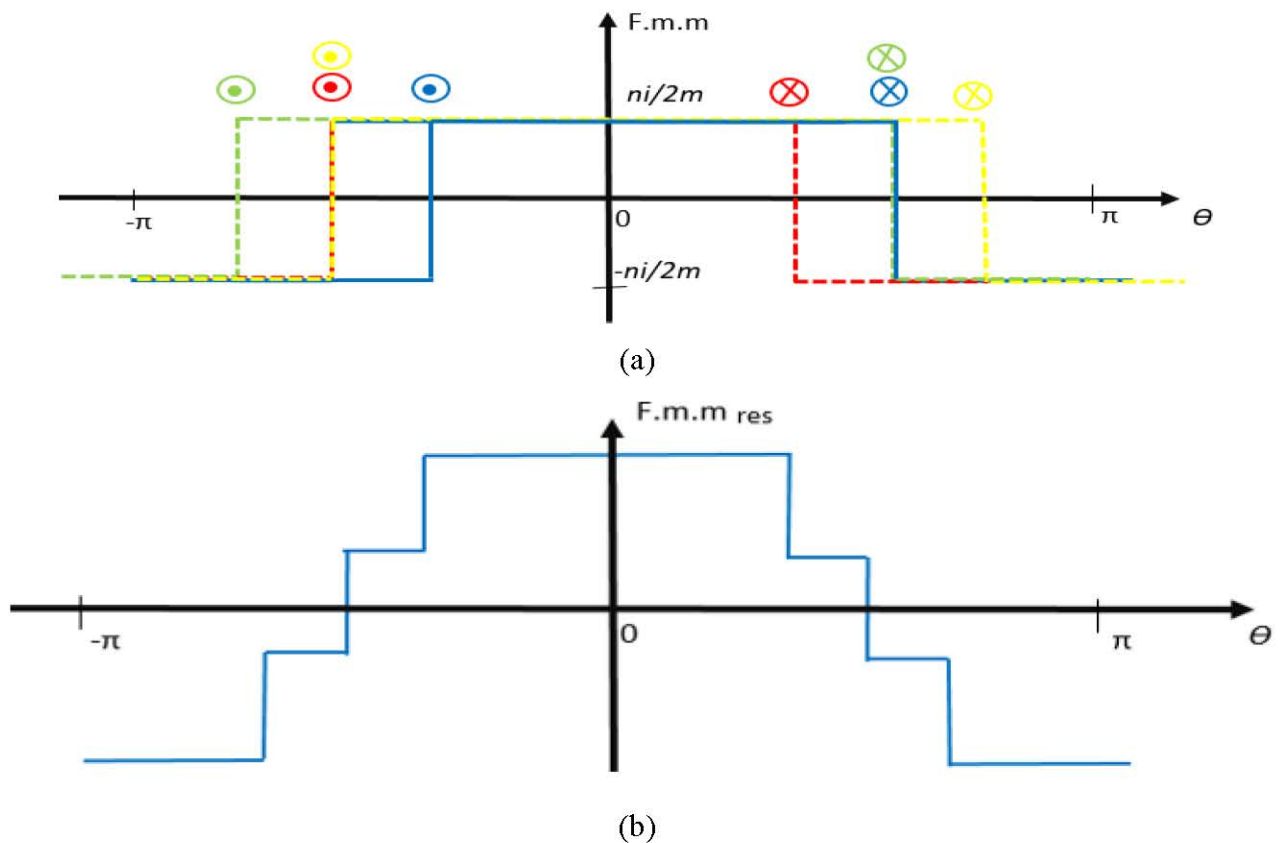


Figure I. 13 : Fmm par phase du bobinage de la FigureI.12

I.6.4 Coefficient de bobinage Kb_h

Il s'agit du produit du coefficient de distribution par le coefficient de raccourcissement :

$$Kb_h = Kd_h \cdot Kr_h \tag{I.18}$$

La décomposition en série de Fourier est identique à celle obtenue pour une bobine diamétrale au facteur multiplicatif kb_h avec $h = 2k+1$:

$$A_{2K+1} = \frac{4.n}{2.(2.k+1)} \cdot (-1)^K \cdot Kb_{2k+1} \tag{I.19}$$

I.6.4.1 Coefficient de raccourcissement :

Les bobinages à pas raccourci, grâce au degré de liberté supplémentaire qu'ils apportent, permettent d'améliorer sensiblement le taux d'harmoniques global, ou de supprimer tel ou tel harmonique particulier en adoptant le pas adéquat

$$Kr_h = \sin \frac{m\beta\pi}{2} \quad (\text{I.20})$$

Ce coefficient est nul si :

$$\frac{m\beta\pi}{2} = k\pi \quad (\text{I.21})$$

Avec k entier

Les valeurs de raccourcissement qui annulent l'harmonique de rang m sont donc :

$$\beta_m = \frac{2k}{m} \quad (\text{I.22})$$

Comme on a toujours intérêt à conserver au coefficient du fondamental la valeur la plus élevée possible, k sera choisi de manière à avoir pour β le plus grand nombre possible inférieur à 1 et donc pour éliminer :

- **L'harmonique 3** : $\beta = 2 \times 1/3 = 2/3$
- **L'harmonique 5** : $\beta = 2 \times 2/5 = 4/5$
- **L'harmonique 7** : $\beta = 2 \times 3/7 = 6/7$

On ne peut donc pas par cette méthode éliminer simultanément deux harmoniques. En revanche, on peut espérer minimiser deux harmoniques impairs consécutifs en se plaçant à des valeurs intermédiaires ; par exemple un pas de 3/4 minimise les harmoniques

3 et 5, un pas de 5/6 minimise les harmoniques 5 et 7, et ainsi de suite. Ce dernier pas, est le plus souvent utilisé en pratique.

Exemple :

Cet exemple se concentre sur l'analyse des effets du raccourcissement des enroulements du moteur asynchrone sur la distribution du potentiel vecteur dans l'entrefer

Une machine bipolaire à 24 encoches, le pas de raccourcissement de 5/6 est faisable, parce que elle a :

$$\text{pas diamétral} : \tau = \frac{Z}{2P} = \frac{24}{2} = 12$$

$$\text{Donc le pas raccourci} : \tau_{racc} = 12 \times \frac{5}{6} = 10$$

Afin de démontrer cet objective, On va simuler ce moteur avec les deux types des enroulements : enroulement concentrique à une couche à pas diamétral et enroulement concentrique double couche à pas raccourci 5/6(10/12) comme illustré sur la Figure I.14.

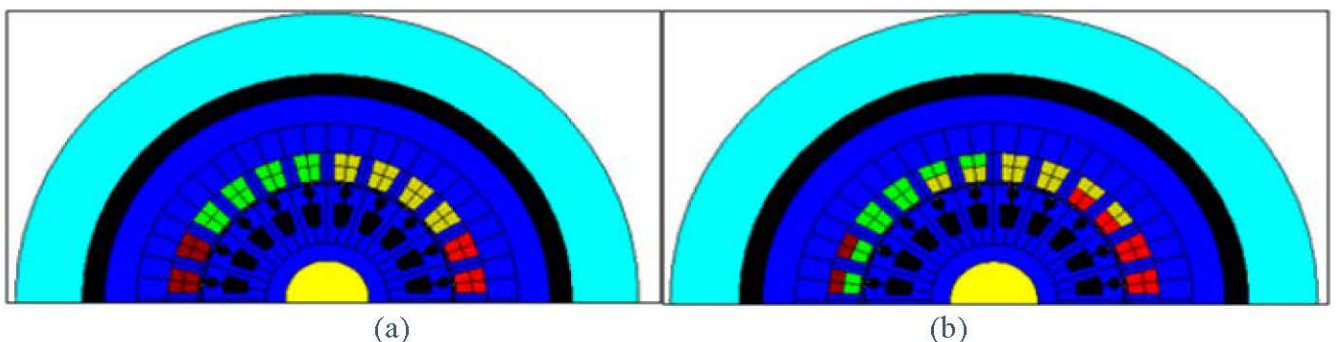


Figure I. 14 : bobinage concentrique du moteur asynchrone triphasé à cage :(a) à une couche à pas diamétral, (b) double couche à pas raccourci 5/6.

Les Figures I.15 et I.16 présentées respectivement la distribution du potentiel vecteur dans l'entrefer et le spectre des harmoniques obtenu par l'analyse FFT pour les deux configurations des enroulements précédemment.

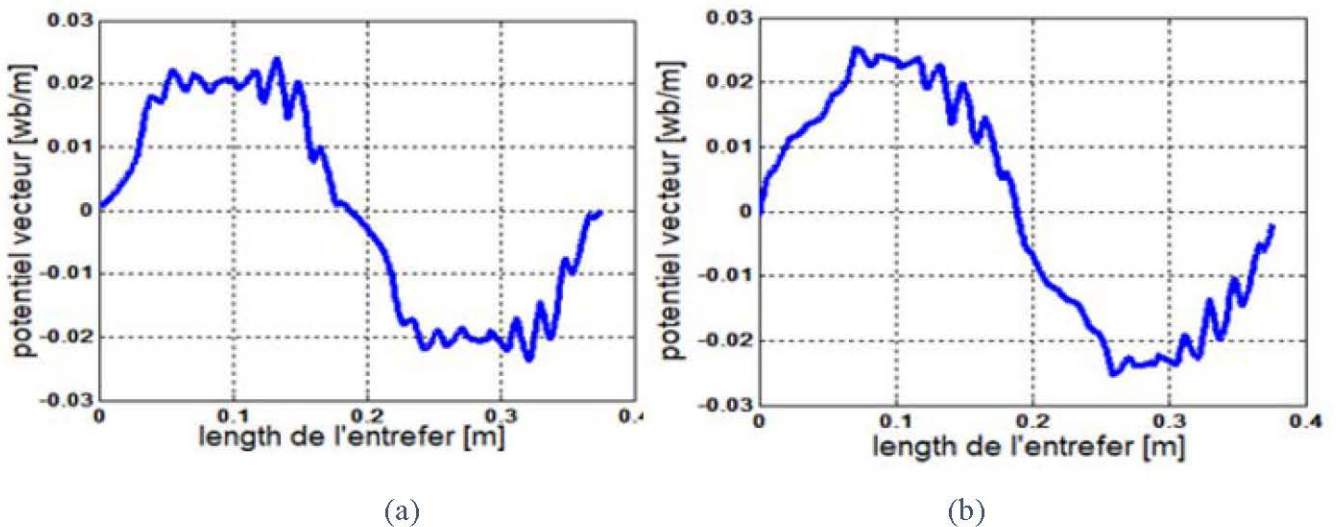


Figure I. 15 : la distribution du potentiel vecteur : (a)enroulement concentrique à une couche, (b) enroulement concentrique double couche à pas raccourci

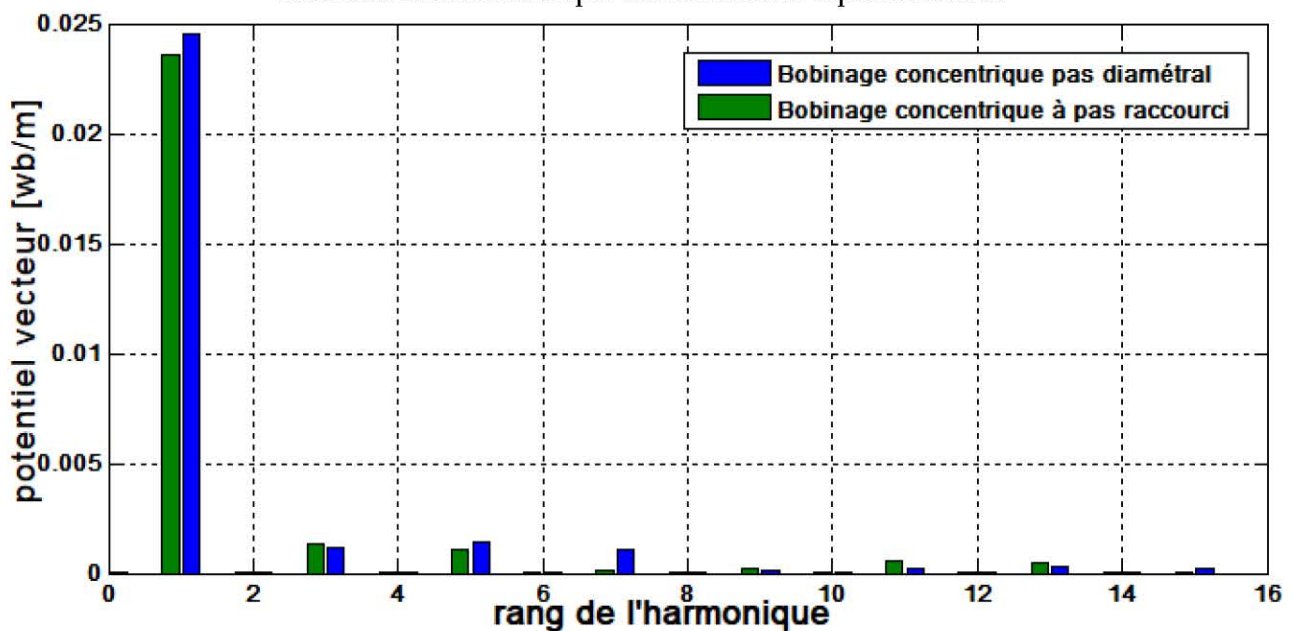


Figure I. 16 : le spectre des harmoniques

I.7 Schémas de bobinage

La répartition en escalier de la F.mm dans l'entrefer. Il est évident qu'elle ne dépend que de la répartition des conducteurs dans les encoches et du nombre d'encoches. En particulier, elle n'est en rien influencée par la manière dont sont réalisées les connexions frontales.

On distingue cinq schémas de bobinage : concentrique à pôles consécutifs, imbriqué diamétral à pôles consécutifs, concentrique à pôles non consécutifs, imbriqué diamétral à pôles non consécutifs et imbriqué raccourci à pôles non consécutifs représentées respectivement par les figures (I.17.a), (I.17.b), (I.17.c), (I.17.d) et (I.17.e). [10]

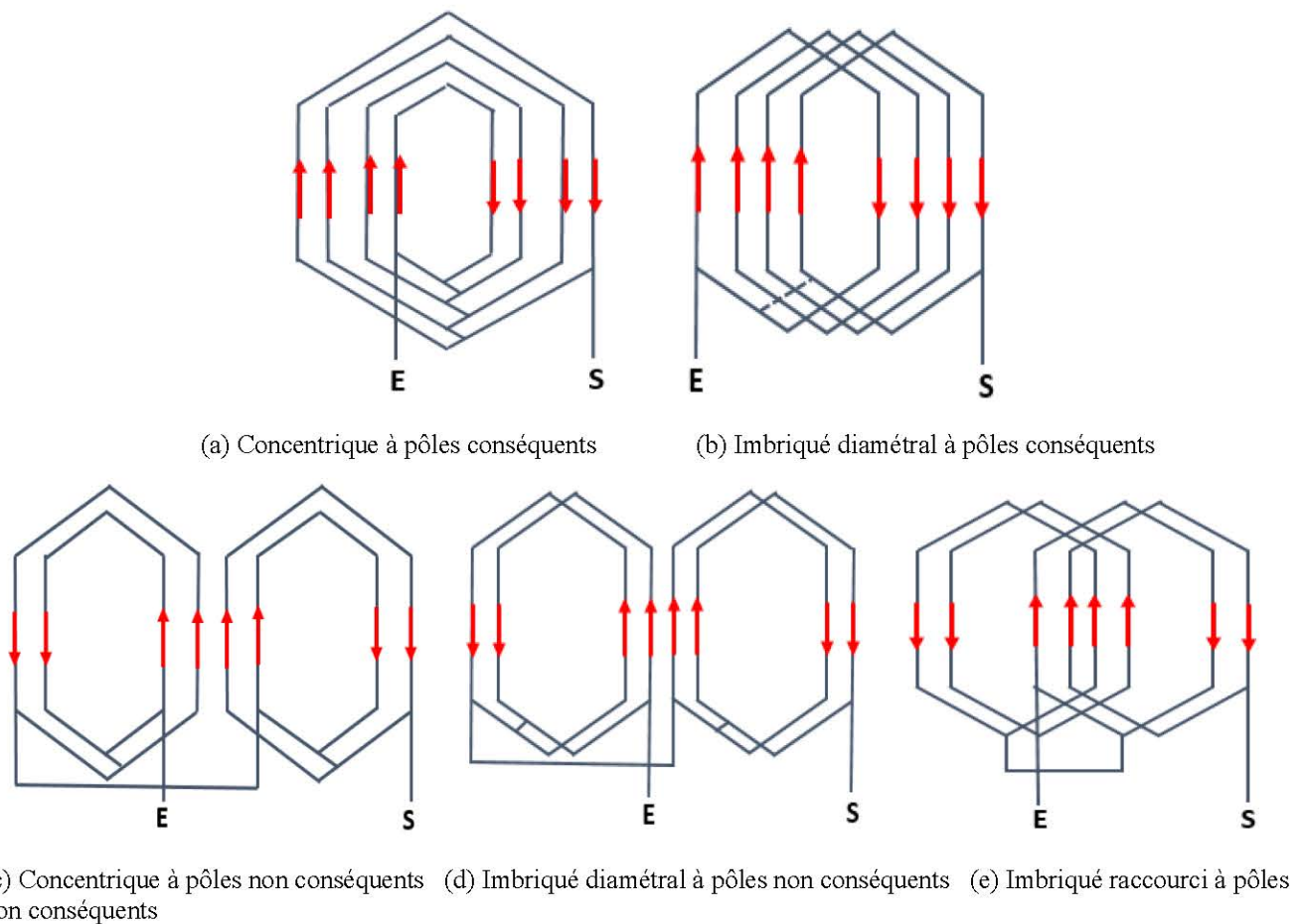


Figure I. 17 : Schémas de bobinage

I.8 Enroulements à une ou deux couches

Selon le nombre de couches de la bobine dans la fente, celle-ci est divisée en enroulement monocouche, enroulement double couche et enroulement multicouche.

I.8.1 Enroulements à simple couche

L'enroulement à une seule couche utilisé dans les petites machines à courant alternatif d'une puissance nominale inférieure à 10 KW. Ce type est effectué lors la machine a grand nombre de conducteurs par encoche. [9] En plus ces enroulements à une seule couche sont hautement isolés en raison des connexions d'extrémité qui sont séparées par de grands espaces d'air qui les rendent adaptés aux hautes tensions. L'absence de séparateur inter-couches est due à un facteur d'espace plus élevé. Les enroulements à une seule couche peuvent être concentriques, également ils présentent quelques avantages : une efficacité plus élevée et un fonctionnement plus silencieux en raison des ouvertures étroites des encoches.

I.8.2 Enroulements à double couche

Les enroulements à double couche sont la classe d'enroulements la plus largement utilisés notamment pour les grosses machines asynchrones d'une puissance supérieure à 10KW. Afin de minimiser les

harmoniques d'espace de haut niveau, il convient d'utiliser une réduction de bobine pour les bords larges, Les enroulements à double couche présentent de nombreux avantages par rapport aux enroulements à une seule couche : plus facile à fabriquer et moins cher pour les bobines, possibilité de raccourcir les bobines et d'utiliser des encoches fractionnées, une réactance de fuite plus faible et donc de meilleures performances de la machine. [14]

I.9 Les différent types d'enroulement triphasé :

I.9.1 Enroulements imbriqués à une seule couche :

Chaque bobine qui forme l'enroulement occupe deux encoches. Puisqu'il doit y avoir autant d'enroulements qu'il y a de phases.

I.9.2 Enroulements imbriqués à deux couches :

L'enroulement imbriqué est le type de bobinage le plus employé dans les stators des moteurs triphasés des moyennes et grandes puissances. Mais on utilise le plus souvent l'enroulement à deux couches. Chaque bobine est formée de la moitié de conducteurs contenus dans une encoche et disposés de façon que l'un des côtés de la bobine soit dans le haut d'une encoche et l'autre dans le fond. Puisque les bobines n'occupent que la moitié d'une encoche, on peut en modifier leurs largeurs et les placées dans une paire d'encoches normale. Les bobines sont habituellement de largeurs réduite et donnent un pas dit raccourci. Cette configuration complique le bobinage, mais présente l'avantage d'atténuer les harmoniques de l'onde de flux et d'améliorer le comportement du moteur. [11]

Exemple : Pour un moteur triphasé a quatre pôles et 24 encoches (48 demi encoches), les demi encoches occupées par chaque phase égale : $48/3=16$ demi encoches

Donc le nombre des bobines par phase égal à 4.

Le nombre d'encoche par pôle de par phase : $q = \frac{Z}{2 p m} = \frac{24}{12} = 2$

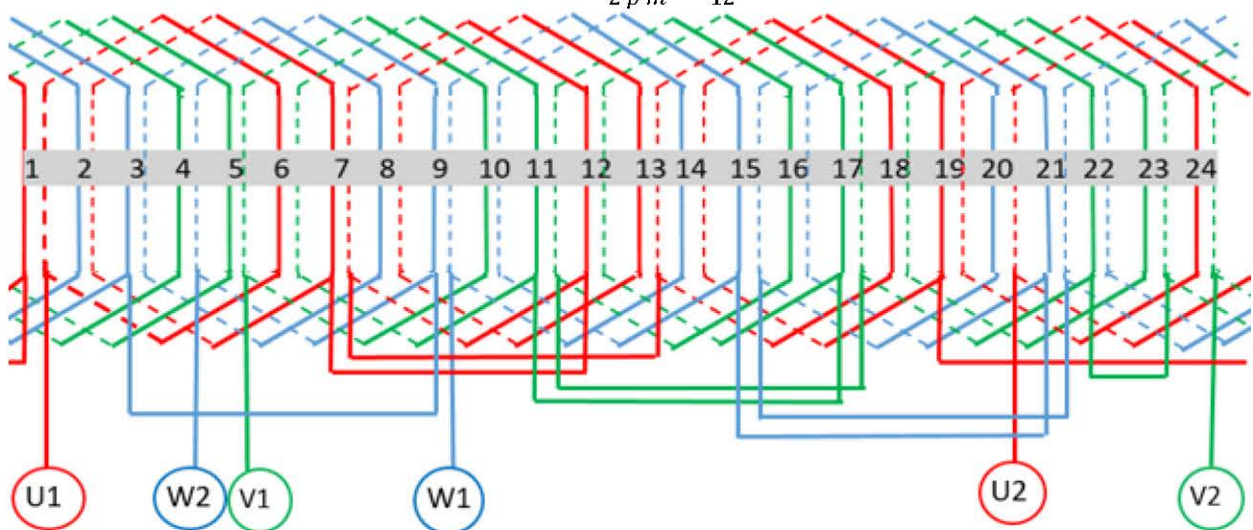


Figure I. 18: Enroulement imbriqué triphasé pour les trois phases à 4 pôles, 24 encoches.

I.9.3 Enroulement concentrique à une couche :

C'est le type d'enroulement à simple couche le plus commun, chaque section bobine occupe et remplit deux encoches. Les trois enroulements des phases occupés un nombre égale des encoches entiers, donc il a l'avantage d'éviter les court-circuits entre phases, mais raccourcissement du pas n'est pas réalisable avec ce type de bobinage, habituellement ce type de bobinage utilisé pour les machines à faible et moyenne puissance :

Exemple : Moteur bipolaire triphasé à 24 encoches ($Z=24$, $m=3$ et $p=1$),

Les encoches occupées par chaque phase égale : $Z/m=8$

$$\text{le nombre des encoches par pôle par phase } q = \frac{Z}{2 p m} = \frac{24}{12} = 2$$

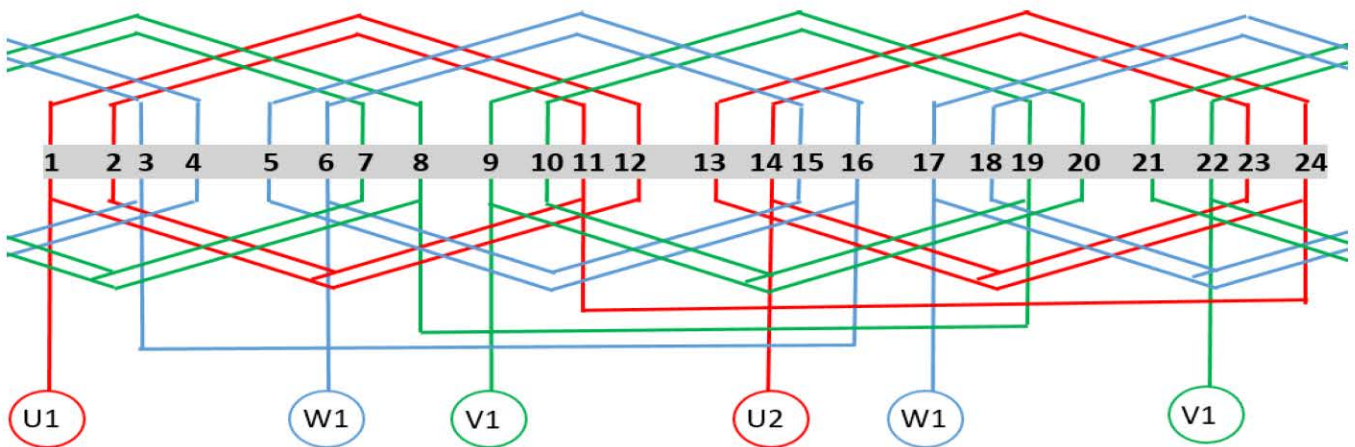


Figure I. 19: Enroulement concentrique monocouche triphasé pour les trois phases à 2 pôles, 24 encoches.

I.9.4 Enroulement concentrique à deux couches :

Le bobinage concentrique à deux couches est destiné pour les applications dans les moteurs asynchrones et synchrones des grandes puissances, ou un nombre important de paires de pôles est nécessaire.

Exemple :

Moteur triphasé à 4 pôles et 24 encoches (48 demi encoches)

$$\text{Le nombre des encoches par pôle par phase : } q = \frac{Z}{2 p m} = \frac{24}{12} = 2$$

Les demi encoches occupées par chaque phase égale : $2Z/m=48/3=16$

Donc le nombre des bobines par phase égal à 4.

$$\text{Pas polaire : } \tau = \frac{Z}{2P} = \frac{24}{4} = 6$$

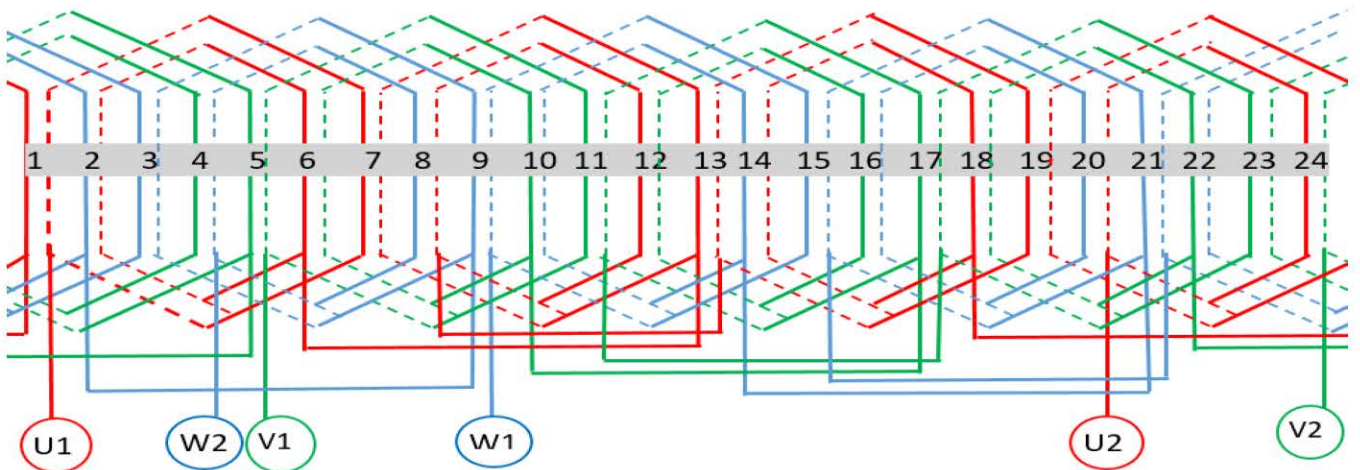


Figure I. 20: Enroulement concentrique double couches triphasé pour les trois phases à 4 pôles, 24 encoches.

I.9.5 Enroulement triphasé à nombre fractionnaire d’encoches par pôle par phase

On parle sur l’enroulement à nombre d’encoches fractionnaire si le nombre d’encoches par pôle par phase écrire sous la (I.22) :

$$q = ns + \frac{g_b}{g_{bt}} \tag{I.22}$$

$g_b < g_{bt}$ et $\frac{g_b}{g_{bt}}$ fractionnaire / g_{bt}, g_b deux nombres entiers

Dans ce cas, on a une partie des groupes de bobines se composent de ns section et une autre partie de groupes de bobines se composent de $(ns+1)$.

Pour chaque g_b groupes de bobines $(g_{bt}-g_b)$ bobines se composent de ns section, et g_b bobines se composent de $(ns+1)$ section. [1]

Exemple : machine triphasé à 4 pôles et 30 encoches ($m=3, p=2$ et $Z=30$)

le nombre des encoches par pole par phase : $q = \frac{Z}{2 p m} = \frac{30}{12} = 2.5 = 2 + 1/2$

Donc pour chaque deux bobines, il y a une compose -de deux sections et d’autre compose de trois section (Figure I.21).

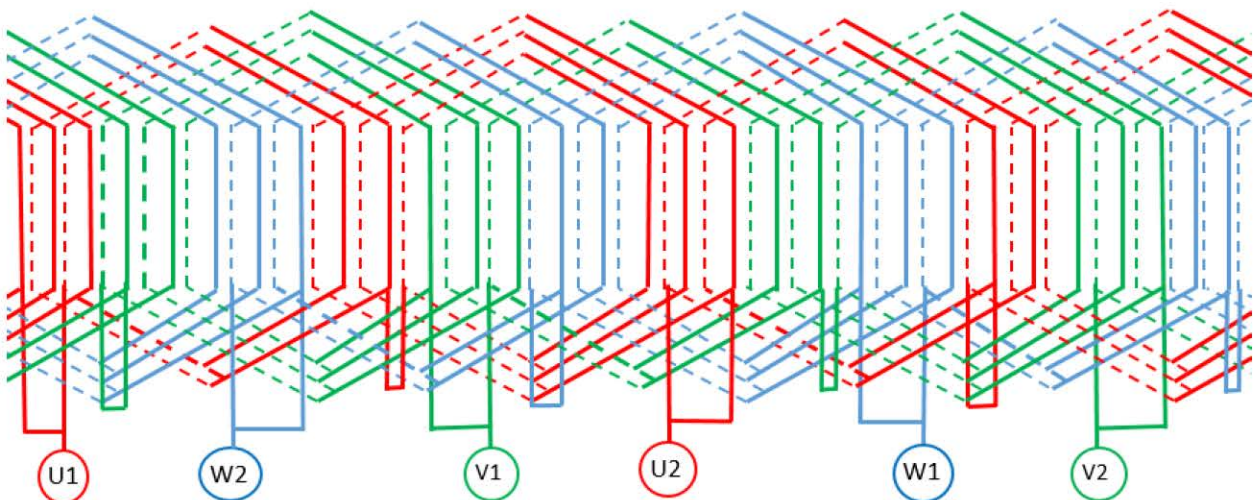


Figure I. 21: Enroulement concentrique à nombre fractionnaire d’encoches par pôle par phase

I.10 Conclusion :

Ce chapitre introductif a permis de situer l'étude dans un contexte général, nous avons scindé en deux parties : la première concerne de la présentation des généralités sur les machines asynchrones et la deuxième partie traite les différents enroulements possibles pour celles-ci.

Le deuxième chapitre sera concentré sur les étapes suivies pour simulé le moteur double cage, afin de démarcher à résoudre la problématique soulignée dans l'introduction générale.

II.1 Introduction

Ce chapitre vise à présenter les étapes de simulation d'un moteur asynchrone double cage par logiciel FLUX2d.

La machine asynchrone triphasé bipolaire double cages couplée en triangle 75kw, 2970 tr/min, 380v, sera simulée en deux dimensions avec un couplage circuit afin de vérifier ses caractéristiques en les comparant avec celles données par le constructeur. Les paramètres électriques des anneaux de court-circuit des deux cages et des têtes de bobine des enroulements statoriques sont calculés par des formules analytiques trouvées dans la littérature. Ces parties ne sont pas prises en compte dans le modèle éléments finis mais sont complètement considérées dans le couplage circuit

En premier lieu l'introduction sur la modélisation par éléments finis est rappelée. Ensuite nous allons présenter le logiciel FLUX2d que nous utilisons dans ce projet et les étapes essentielles pour simuler une machine asynchrone aux conditions prédéterminées. Enfin les résultats de simulation de la machine situés précédemment sont présentés.

II.2 Présentation du logiciel flux2d :

C'est un logiciel de modélisation par éléments finis prenant en compte les phénomènes magnétiques et thermiques et permettant des régimes évolutifs. C'est donc un logiciel parfaitement adapté à nos besoins. Le logiciel permet de calculer et de visualiser les grandeurs utiles à l'ingénieur, pour des dispositifs bidimensionnels ou à symétrie de révolution comportant des matériaux à caractéristiques linéaires ou non, isotropes ou non. C'est un logiciel complet ayant l'avantage de permettre le couplage avec les équations de circuits ainsi que l'ajout d'une région surfacique pour l'étude des machines tournantes avec différentes positions du rotor, sans avoir à modifier la géométrie et le maillage. La résolution d'un problème fait appel à des modules spécialisés. [20] [21]

II.3 Processus d'élaboration d'un projet Flux2d

Cette processus est passer par cinq étapes essentielles, comme montrer dans l'enchaînement qui schématisé par la Figure II.1.

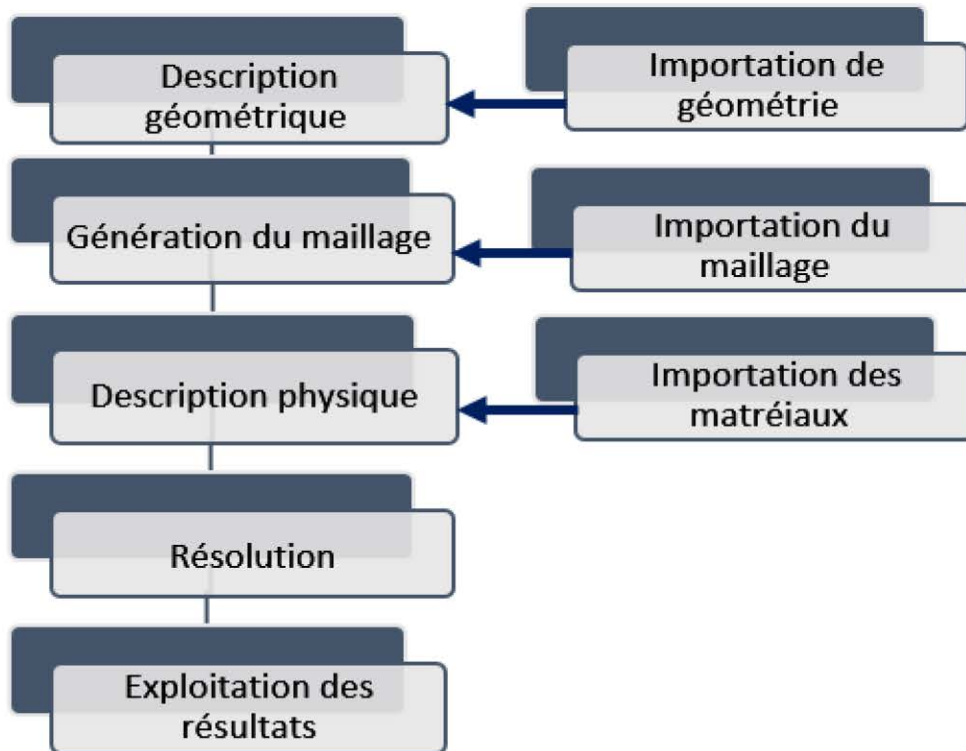


Figure II. 1: Enchaînement des étapes d'un projet Flux2d

II.3.1 Préparation des données liées au problème étudié et choix du type de simulation

On ouvre le superviseur Flux. On choisit le type de simulation d'étude (2d, 3d, Skew ou PEEC) qui convient. On ouvre un nouveau projet, une fenêtre de travail s'ouvre. Dans le Menu application on choisit le type d'application (magnétique, électrique, thermique ou couplé) qui convient à notre cas d'étude.

Dans les machines électriques, le calcul du champ électromagnétique est un problème qui est en réalité à caractère tridimensionnel. Il existe des cas à modèle simplifié en 2d si les hypothèses suivantes sont vérifiées :

- La profondeur de la machine est supposée infiniment long,
- Le flux est concentré dans le plan perpendiculaire à l'axe de rotation de la machine (les fuites de flux négligeables dans la 3ième axe).

II.3.2 Description géométrique :

Ensuite, on doit préparer les principales caractéristiques de la géométrie : l'utilisation des symétries ou périodicités, les caractéristiques du descripteur géométrique de Flux et les outils géométriques. Flux2d permet d'importer une géométrie, également il contient un outil spécial pour construire les machines tournantes appelé contexte Overlay2d.

Dans ce projet la création de la géométrie réalisée à l'aide de la contexte Overlay2d, mais la particularité des cages rotoriques entraînent de faire des modifications géométriques.

II.3.3 Génération du maillage :

Le maillage de la géométrie consiste à découper le domaine en plusieurs sous domaines appelés éléments surfacique généralement de forme triangulaire, ces éléments sont générés automatiquement par un générateur de maillage dans le modèle **Preflux**, mais la taille des mailles peut être contrôlée l'opérateur. Preflux donne l'avantage de propagation des surfaces et leur maillage au même temps

II.3.4 Description physique

La phase de description physique comporte quatre étapes successives :

- Choisir le type d'application physique : magnétique, thermique ou électrique. Chaque application de Celles-ci est regroupée en trois applications secondaires (statique, harmonique ou transitoire).
- Implémenter un circuit afin d'obtenir des régions similaires liées avec les composants électriques.
- Création ou import des matériaux et leurs propriétés magnétiques et électriques.
- Créer les ensembles mécaniques : fixe ou mouvement.
- Définition des régions surfaciques, enfin ces régions affectées pour chaque élément de la géométrie.
- Dans notre cas on choisit l'application magnéto-harmonique, puis nous avons créé un circuit qui convient de la machine étudiée et définir les matériaux utilisables (cuivre, bronze, acier et ASE METAL M530-50A), ensuite on crée deux ensembles mécaniques rotatif et fixe, cette phase terminée par la création des régions surfacique et affectées pour élément de la géométrie.

II.3.5 Résolution

Constitué principalement d'un module de résolution 2D des différents modèles usuels de l'électromagnétisme et des problèmes thermiques.

Flux2d est basé sur la méthode de Newton-Raphson. Il développe la résolution d'un problème non-linéaire en des étapes itératives : [3]

- Il commence par une première résolution en utilisant pour les propriétés non linéaires des valeurs initiales : valeur de la pente à l'origine pour la perméabilité ou la permittivité, valeurs d'un calcul précédent en cas de reprise d'une résolution, ...,
- Ensuite il effectue des itérations jusqu'à obtention de la solution. A chaque itération il :
 - Ajuste les valeurs des propriétés non linéaires pour devient adapté avec la valeur de la variable calculée précédemment.
 - Résout à nouveau le problème,
 - Compare les résultats obtenus aux résultats de la solution précédente, si la tolérance est plus grande que le critère de précision choisi, Flux 2d effectue une nouvelle itération.

II.3.6 Exploitation des résultats,

Dans cette phase on peut exploiter les résultats d'un calcul sous différentes formes. Ces résultats prouvent être affiché sous forme des courbes en 2d pour les différents grandeurs (électriques, mécaniques et magnétiques) ou sous forme des équipotentielles ou les lignes de flux. Aussi ils pouvant e calculer des grandeurs globales comme le couple, le courant, les flux, les puissances les pertes

II.4 Modèle 2D magnéto harmonique

En Magnéto Harmonique les grandeurs électriques et magnétiques sont supposées à variation sinusoïdale dans le temps.

L'EDP à résoudre est donnée par (II.9) :

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \operatorname{rot} A \right) + j\omega\sigma A = J \quad (\text{II.1})$$

II.4.1 Couplage du circuit du rotor :

L'équation électromagnétique exprimée en potentiel vecteur magnétique à résoudre dans la cage du rotor donné par :[4]

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \operatorname{rot} A \right) + \sigma(j\omega A + \operatorname{grad}(v)) = J \quad (\text{II.2})$$

On suppose que l'effet de peau dans les barres rotoriques est négligeable. La tension aux bornes d'une barre i est calculée à partir le potentiel vecteur magnétique comme suit :

$$(U_i^r) = R_b \cdot I_i^r + \frac{l}{s_b} \iint j\omega \cdot \vec{A} \cdot \vec{n} \, ds \quad (\text{II.3})$$

Avec : I_i^r le courant de barre i de section s_b et de longueur l

II.4.2 Formule du circuit statorique

On suppose que la machine étudiée est équilibrée, l'effet de peau négligeable dans les conducteurs statoriques également la variation axiale du potentiel vecteur est négligeable.

L'équation électrique représente une seul phase statorique donnée par :

$$U_i = R_{ph} \cdot I_i + L_{tet} - j\omega L_i + E_i \quad (\text{II.4})$$

Avec :

R_{ph} : la résistance de l'enroulement d'une phase

L_{tet} : l'inductance du bobinage d'une phase situé dans les chignons

E_i : la force contre-électromotrice créée par le champ magnétique sur la partie de l'enroulement située dans les encoches du stator.

II.5 Modèle 2D magnétique-transitoire :

L'application Magnétique transitoire permet l'étudier les phénomènes engendrés par un champ magnétique variable dans le temps. Le champ magnétique est lié à la présence de courants transitoires.

Ce modèle est décrit par l'équation aux dérivées partielles (II.10) avec une discrétisation pas à pas du temps.

La précision de leurs calculs à grâce de la prise en compte de courants induits dans les régions conductrices, ainsi que la prise en compte, dans ces régions conductrices, des effets de peau et de proximité. [4]

$$\overrightarrow{rot} \left(\frac{1}{\mu_0} [\mathbf{V}_r] \overrightarrow{rot} (\vec{A}) - \vec{H}_c \right) + \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{grad} v \right) = 0 \quad (\text{II.4})$$

Avec $[\mathbf{V}_r]$: est le tenseur de réflectivité magnétique du milieu.

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide (en H/m).

\vec{A} : est le potentiel vecteur magnétique (en Weber/m).

\vec{H}_c : est le champ magnétique coercitif (en A/m).

σ : est la conductivité électrique du milieu (en S/m).

V : est le potentiel scalaire électrique (en V) ;

t : Temps (en s).

L'équation mécanique liée entre la machine asynchrone et sa charge donnée par la formule

$$J_m \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial t} + f_v \Omega + C_{ch} - C_{em} = 0$$

J_m : Le moment d'inertie de la machine

Ω : La vitesse angulaire du rotor

f_v : Le frottement visqueux du rotor

C_{ch} : Le couple charge

C_{em} : Le couple électromagnétique de la machine

II.6 Les données de la machine étudiée

Le constructeur de l'électro-industrie AZAZGA a donné les caractéristiques du moteur de hauteur d'axe 2 pôles (280-2) comme montré sur le tableau II.1

Tableau II. 1: Caractéristiques du moteur 280-2 (voir *annexe* pour plus de détails)

	Paramètres	valeurs	Unité
MACHINE	Puissance	75	KW
	Tension	220/380	V
	Courant nominal	140	A
	Courant de démarrage/ Courant nominal	6.3	/
	fréquence	50	Hz
	Vitesse nominale	2970	tr/min

	Nombre de pôles	2	/
	Couple nominal	240	N.m
	Couple de démarrage / couple nominal	1.6	/
	Glissement nominale	0.01	/
	Longueur du paquet	270	mm
STATOR	Nombre d'encoche	36	/
	Diamètre extérieur	410	mm
	Diamètre intérieur	230	mm
	Connexion	triangle	/
	Résistance par phase	0.0476	Ω
ROTOR	Nombre d'encoche	28	/
	Diamètre extérieur	227.8	mm
	Diamètre intérieur	135.2	mm
	Diamètre d'arbre	100.04	mm
ENTREFER	Épaisseur	1	mm

II.7 Configuration des enroulements statoriques

Le stator de la machine étudiée est constitué de $Z=36$ encoches dans lesquelles sont logées les enroulements. Le bobinage statorique est de type concentrique à double voies (deux voies parallèles) et à double couches (chaque encoche loge deux faisceaux de conducteurs de deux bobines différentes). Puisque la machine est triphasée bipolaire ($m=3$ et $p=1$) donc le nombre d'encoches par pôles par phase « q » peut être calculé comme suite :

$$q = \frac{Z}{2mp} = 6$$

En effet, il y a deux bobines par phase connectées en parallèle chaque bobine constituée de 6 sections, mais pour diminuer les têtes des bobines, le constructeur a proposé une répartition de chaque bobine en deux demi bobine (bobine double) connectées en série.

Le pas polaire est donné par l'expression suivante :

$$\tau = \frac{Z}{2p} = 18$$

Également le bobinage évalué un raccourcissement de $15/18$, comme illustré à la Figure II.2

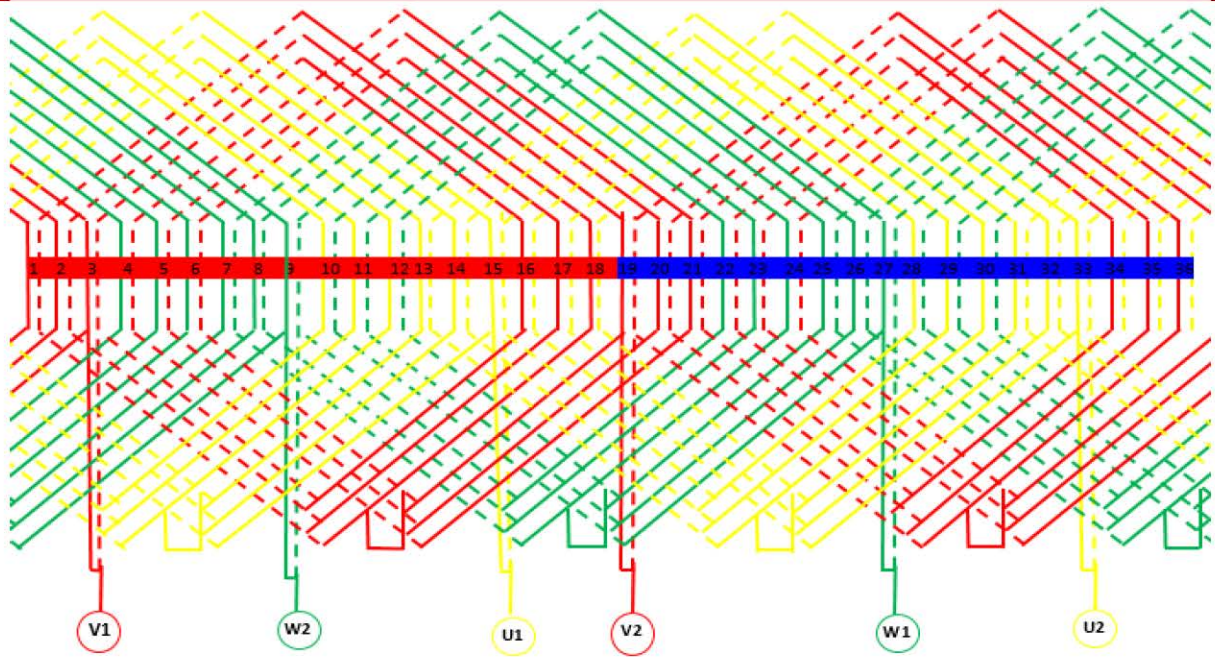


Figure II. 2 : Schéma de bobinage développé du moteur étudié

II.8 Procédure de simulation du moteur 280-2 dans Flux 2d

II.8.1 Implémentation de la géométrie et maillage

Dans le logiciel Flux2d, pour construire une géométrie identique avec les données du constructeur, on doit procéder en deux étapes :

Première étape, il faut entrer tous les dimensions exigées (sous forme de variables). Pour de créer facilement la géométrie de la machine on utilise le contexte interactif Overlay 2d (outil Flux2D dédié exclusivement aux machines électriques tournantes). La figure II.3 représente la géométrie finale construite par des valeurs spécifiques de notre machine grâce au contexte Overlay. Nous avons procédé à certaines modifications pour adapter exactement la géométrie de la machine réalisée sous le contexte Overlay à celle du constructeur.

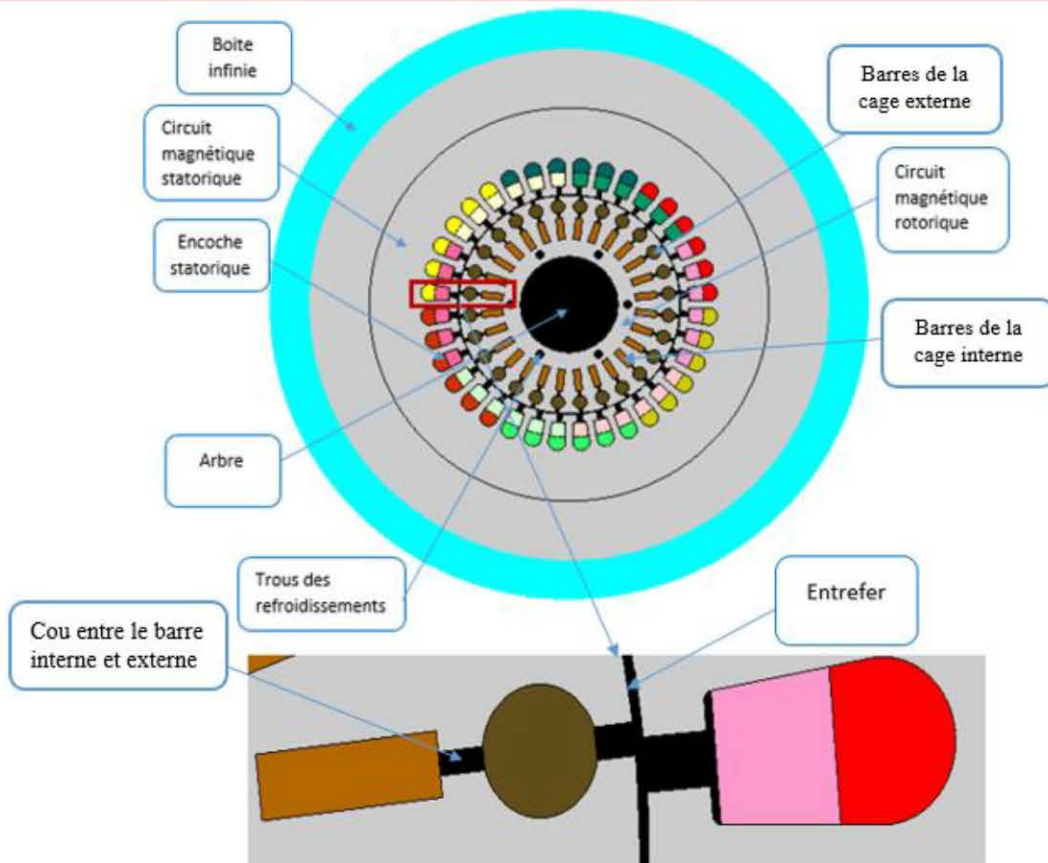


Figure II. 3 : Modèle géométrique du moteur asynchrone 280-2

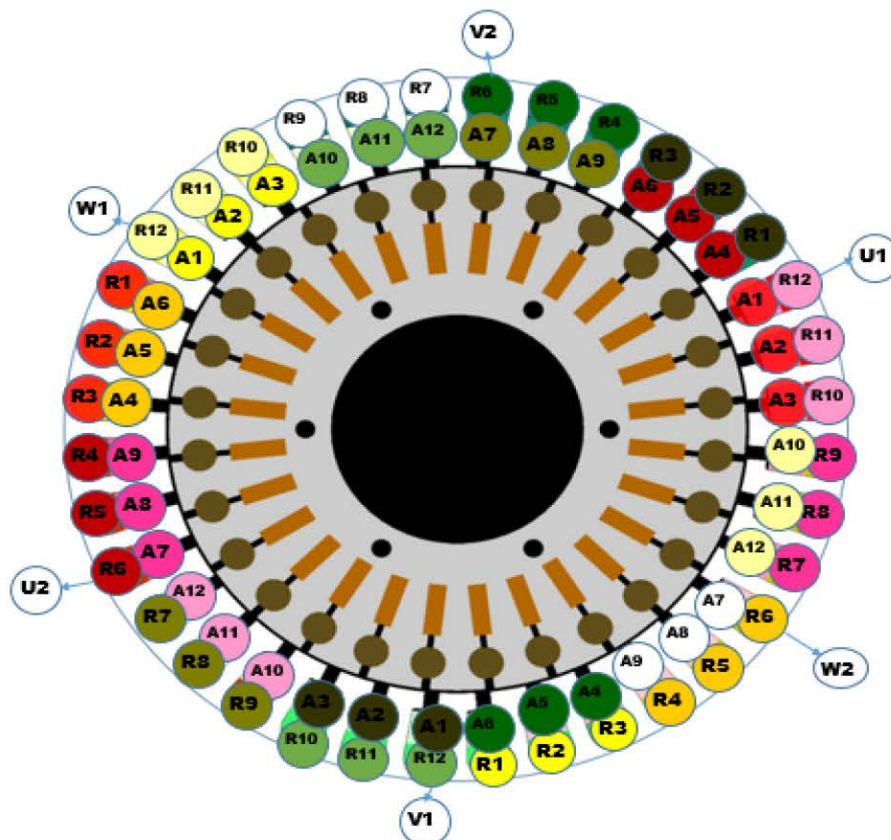


Figure II. 4: Schéma de bobinage circulaire du moteur 280-2

Dans deuxième étape, nous avons introduit le bobinage tel qu'il est donné par le constructeur (Figure II.2). Pour implémenter fidèlement cette configuration de bobinage dans l'environnement Flux2d, nous avons préparé une schéma circulaire adapté donné par la Figure II.4.

Le logiciel Flux 2d permet de lancer automatiquement le maillage. Dans les problèmes électromagnétique le maillage triangulaire est le plus utilisé, afin de trouver un maillage plus fin nous avons créé une discrétisation très faible distance pour certaine région comme l'entrefer les encoches statoriques et les barres rotorique.

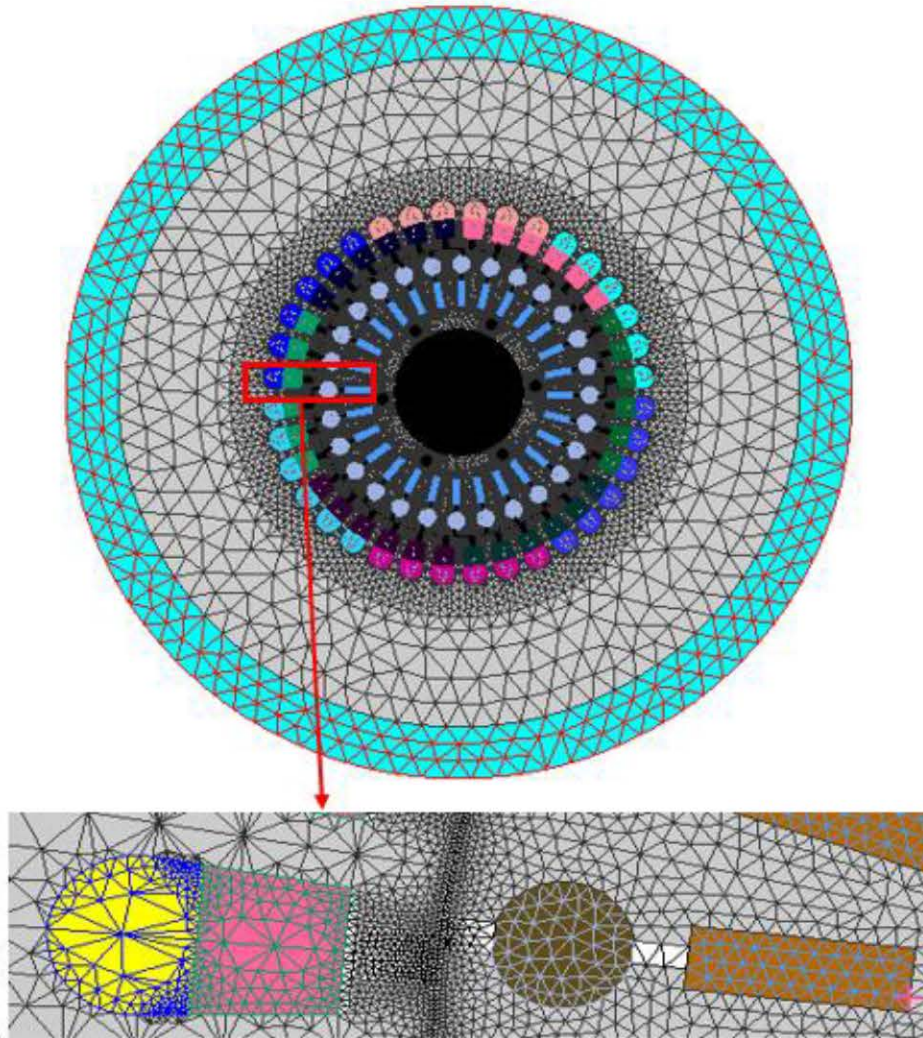


Figure II. 5 : Maillage de la machine entière et au tour de l'entrefer

II.8.2 Description Physique

La description physique passé par cinq étapes, dans notre projet en réalésant comme suite :

- Le choix de l'application physique : magnéto-harmonique.
- Définition des conditions aux limites : on donne la condition Dirichlet.
- Création des matériaux :il y a deux types des matériaux utilisés

Matériau magnétique : le circuit magnétique statorique et rotorique consiste par matériau non linéaire appelé ASE METAL M530-50A, celui-là présente un courbe de saturation a fonction isotrope spline comme voir dans (Figure II.6).

Matériau conducteur : on affectera trois matériaux différents selon la région composée et leur caractéristique : le cuivre pour les régions des conducteurs statoriques et les barres de cage intérieur, le bronze pour les barres de la cage extérieur et l'acier pour l'arbre du moteur.

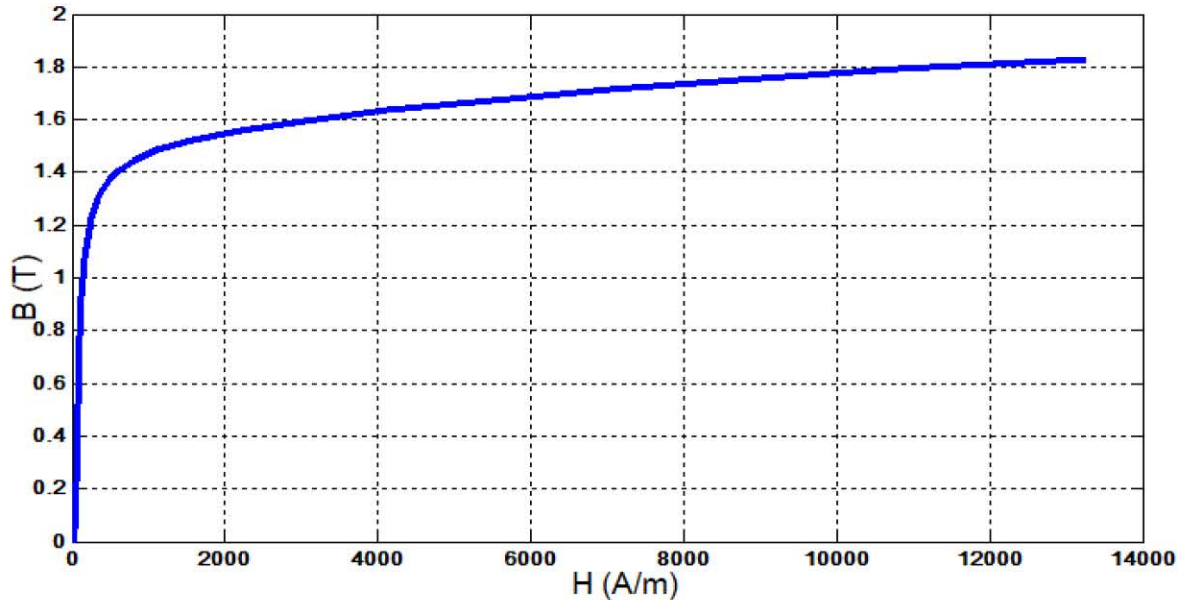


Figure II. 6 : Courbe d'alimentation du matériau magnétique

Création des régions matérielles et affectation aux entités géométriques et également avec des ensembles mécaniques.

Dans notre cas, On peut ordonner les deux étapes précédents per le tableaux II.2.

Tableau II. 2: Caractéristiques des régions surfaciques

Région surfacique	Matériau utilisé	Ensemble mécanique
Circuit magnétique rotorique	ASE METAL M530-50A	Mouvement
Circuit magnétique statorique	ASE METAL M530-50A	Fixe
Conducteurs statoriques	cuire	fixe
Barres de la cage interne	cuire	Mouvement
Barres de la cage externe	bronze	Mouvement
Entrefer	air	Comparable
Arbre	Acier S355J2-105	Mouvement
Le cou entre le barre interne	air	Mouvement

II.8.3 Couplage élément finis – circuit électrique

Le circuit électrique permet d'associer les différents composants électriques avec leurs régions surfaciques dans le modèle géométrique.

- Les sources des tensions

- Deux types des conducteurs concernés par le couplage circuit :
 - Les conducteurs bobinés utilisées pour définir le bobinage statorique.
 - Les conducteurs massifs : siège de courants de Foucault.
- Un circuit électrique d'une cage d'écureuil comprend les composants suivants :
 - Un conducteur massif pour chacune des barres du rotor,
 - Une résistance et une inductance pour chacune des portions de têtes d'anneaux comprises entre deux barres.

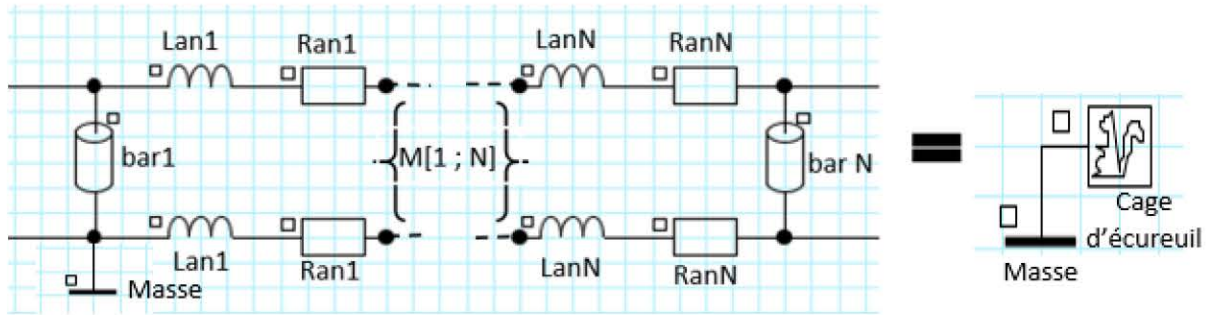


Figure II. 7 : Circuit équivalent de la cage d'écureuil

II.8.3.1 Calcul les paramètres du circuit :

Pour représenter parfaitement le circuit électrique du moteur, il faut prendre en considération les effets d'extrémités (inductance, résistance de tête de bobine et d'anneau de court-circuit). Les valeurs des inductances et des résistances inter-barres sont calculées analytiquement par la dépendance sur les formules de Trickey ou celles d'Alger. [16, 17]

➤ L'inductance inter- barre est donnée par

$$L_{fann} = \frac{p_{fann}}{2 \sin^2\left(\frac{p\pi}{N_R}\right)} \tag{II.5}$$

p_{fann} : la perméance de fuite des anneaux donnée par

➤ La résistance inter-barre est

$$R_{ann} = \rho \frac{l_{an}}{s_{an} N_R} \tag{II.6}$$

Avec

l_{an} : Périmètre de l'anneau (m)

N_R : Nombre de barres rotoriques

ρ : Résistivité des barres ($\Omega.m$)

s_{an} : Section de l'anneau en (m^2)

$$s_{an} = e_{an} \frac{D_E + D_i}{2} \tag{II.7}$$

La Figure II.8 illustre la description géométrique de l’anneau de court-circuit.

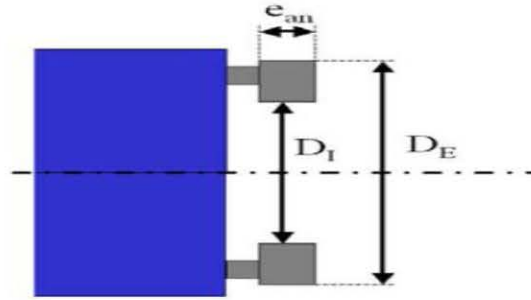


Figure II. 8: Paramétrage de l’anneau

Cependant, la formule de T. Miller et avec son avantage, elle semblera plus pertinente pour calcul l’inductance des têtes bobines. [22]

$$L_{TB} = \frac{n}{a^2} \frac{\mu_0 N^2 D}{2} \ln\left(\frac{4D}{GMD} - 2\right) \tag{II.8}$$

Avec

μ_0 : Perméabilité du vide

N : Nombre de spires en séries par bobine

n : Nombre de bobines par phases

a : Nombre de chemins en parallèle

D : Diamètre moyen des spires (m)

GMD : Distance moyenne entre deux conducteurs dans l’encoche (m) ($GMD = 0.0474\sqrt{A}$)

A : Surface d’une encoche (ou d’une demi encoche dans le cas d’un bobinage à deux couches)

Le tableau II.3 présenté les valeurs calculées :

Tableau II. 3: Les valeurs des paramètres du circuit

	L’anneau interne		L’anneau externe		Les têtes bobines	
Le grandeur	Lan1(H)	Ran1(Ω)	Lan2H	Ran2 (Ω)	Ltb(H)	Rtb(Ω)
La valeur	1.1685e-8	1.5897e-6	6.0916e-8	1.4326e-5	1.4e-3	6.37 e-2

II.8.3.2 Interprétation du circuit :

Ce circuit est constitué principalement de plusieurs groupes de composants, chaque groupe de composants regroupe plusieurs éléments :

- La source d'alimentation triphasée, contient trois sources de tension déphasées les unes des autres de 120° .
- L'enroulement triphasé statorique couplé en triangle et relié à la source triphasée. Chaque phase de l'enroulement triphasé est constituée de deux voies parallèles. Chaque voie est composée d'une bobine de six sections.
Chaque section comporte deux faisceaux de conducteurs allé et retour.
- Les têtes bobines sont représentées par une inductance et une résistance équivalentes.
- Deux cages rotoriques ne sont pas liées électriquement. Chaque cage composée en 28 barres présentés par les conducteurs massifs et 2 anneaux présentés par des résistances et des inductances.

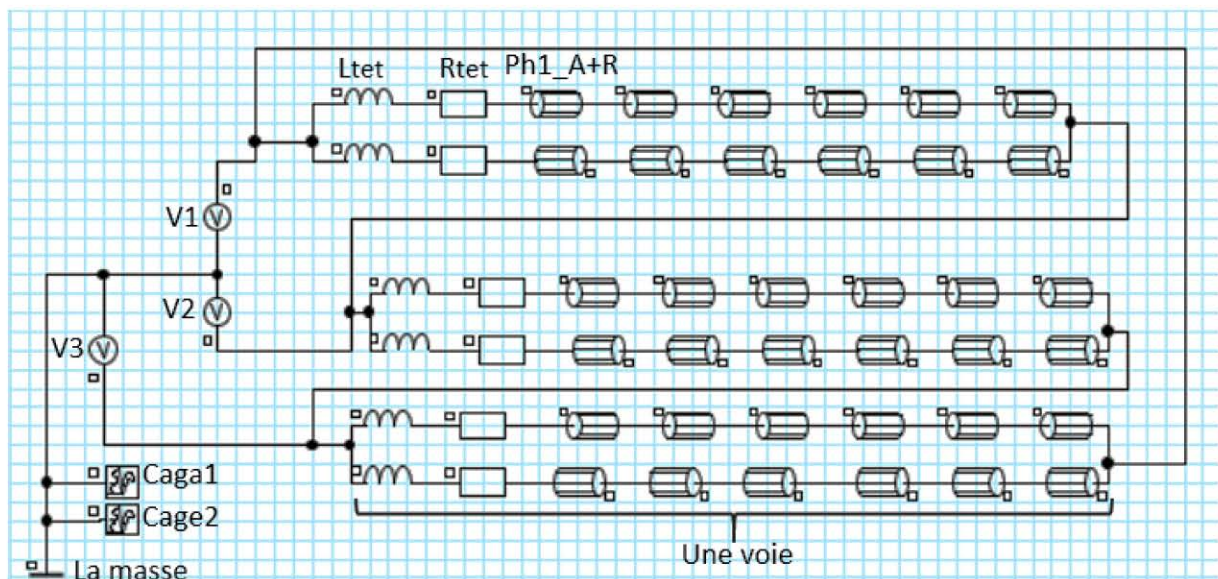
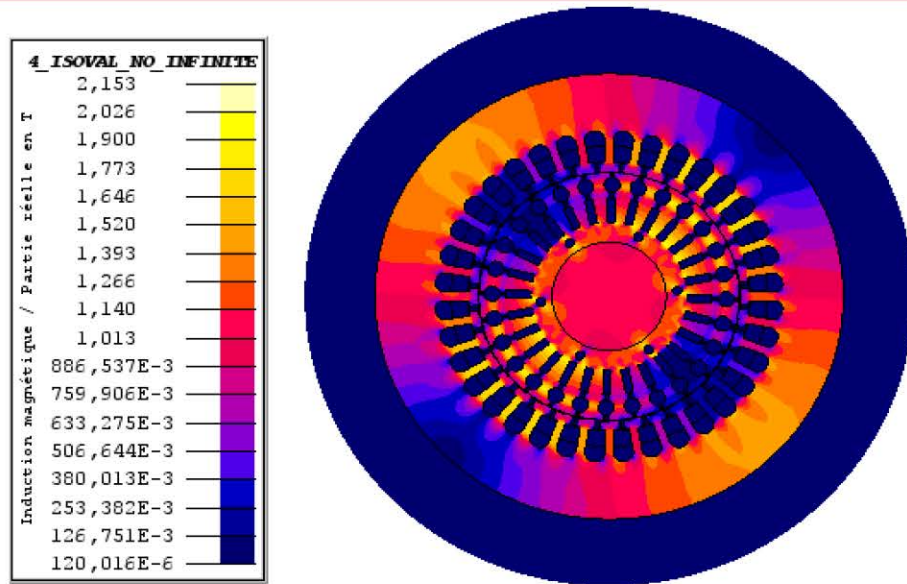


Figure II. 9: Circuit équivalent de couplage

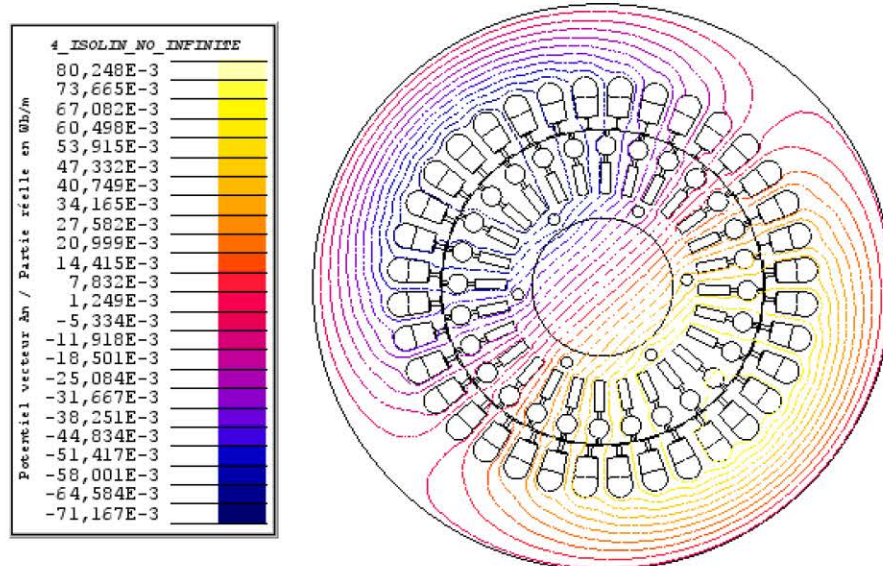
II.8.4 Résolution et exploitation des résultats :

En régime magnéto-harmonique :

Dans ce régime tous les résultats exposent en fonction de variation de glissement (vitesse). La répartition de l'induction magnétique et le vecteur de potentiel au régime de fonctionnement nominal ($g=0.01$) est présenter un axe de symétrie aux moitié du moteur. Alors il montre que le moteur étudié est un moteur bipolaire.



(a)



(b)

Figure II. 10: Représentation de la répartition :(a) induction magnétique, (b) vecteur potentiel

Variation du potentiel magnétique au long de l’entrefer :

Pour montre le comportement du bobinage, nous présentons le potentiel vecteur au long de l’entrefer, ensuite nous appliquons la décompensation en FFT afin de vérifier les harmoniques d’espaces (Figure II.11) :

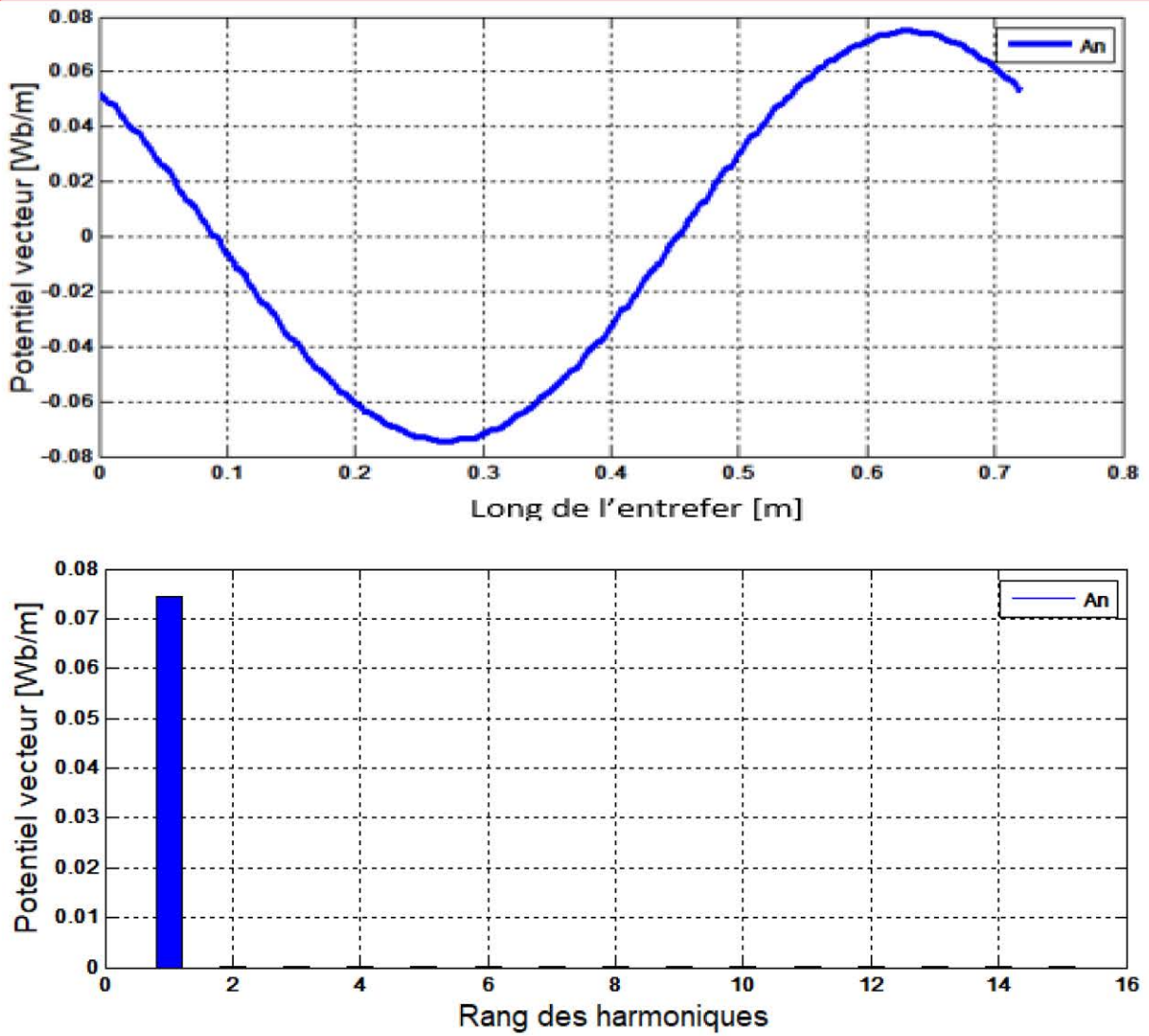


Figure II. 11: Le potentiel vecteur magnétique et leurs harmoniques

Les Figures (II.12, II.13, II.14, II.15 et II.16) montrent respectivement l'évolution de couple électromagnétique, courant de phase, puissance active absorbé, le facteur de puissance et l'efficacité du moteur à étudié en fonction du glissement.

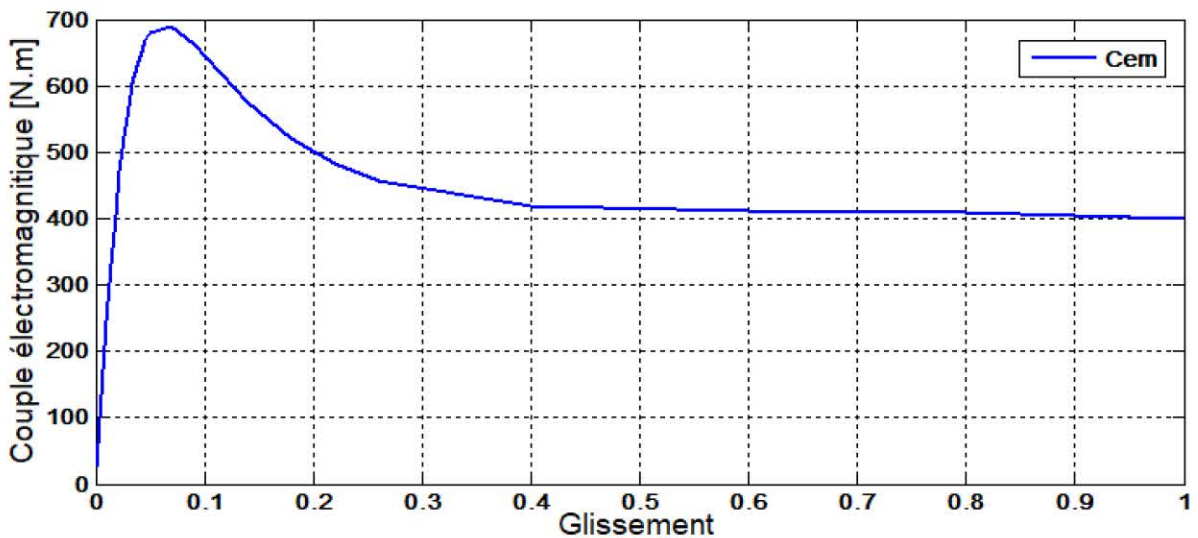


Figure II. 12: Le couple en fonction du glissement

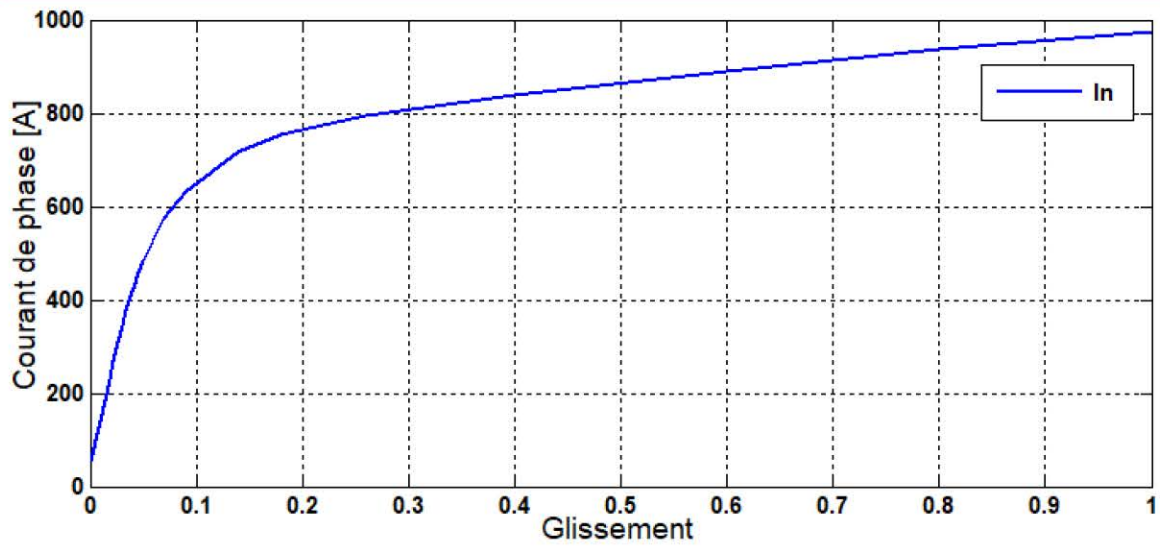


Figure II. 13: courant de phase en fonction du glissement

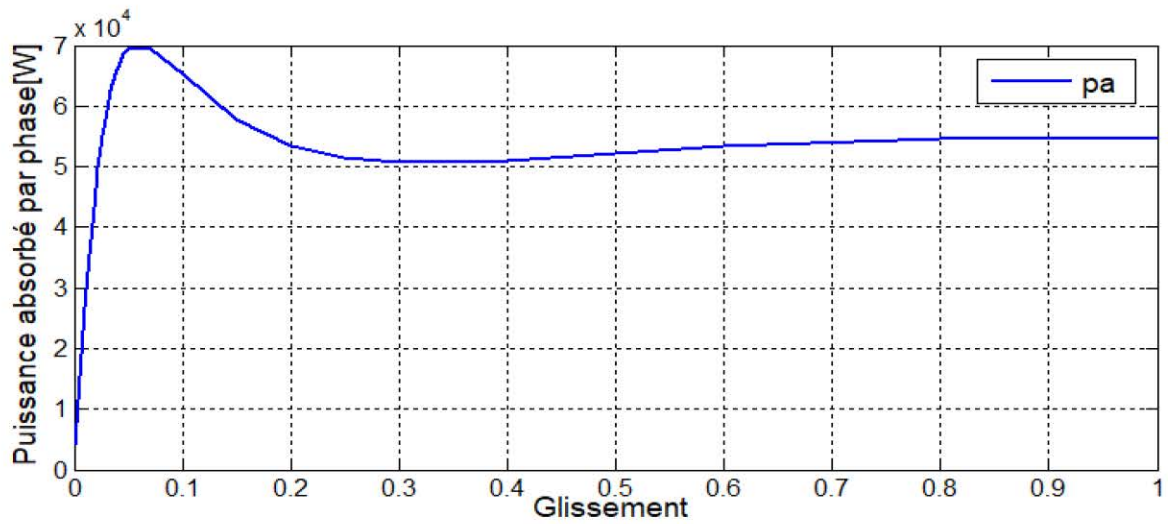


Figure II. 14: Puissance active absorbé en fonction du glissement

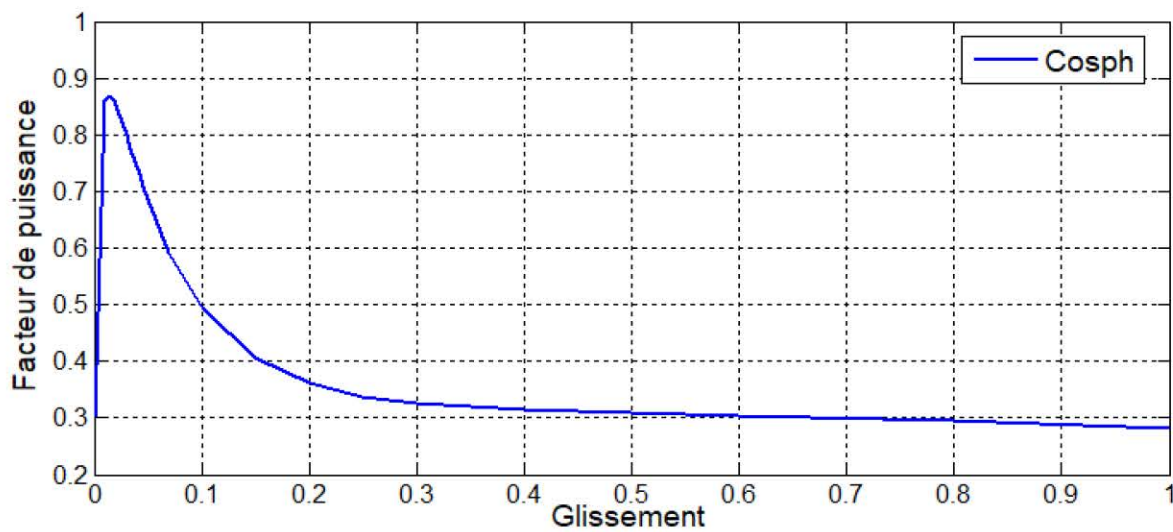


Figure II. 15: Facteur de puissance en fonction du glissement

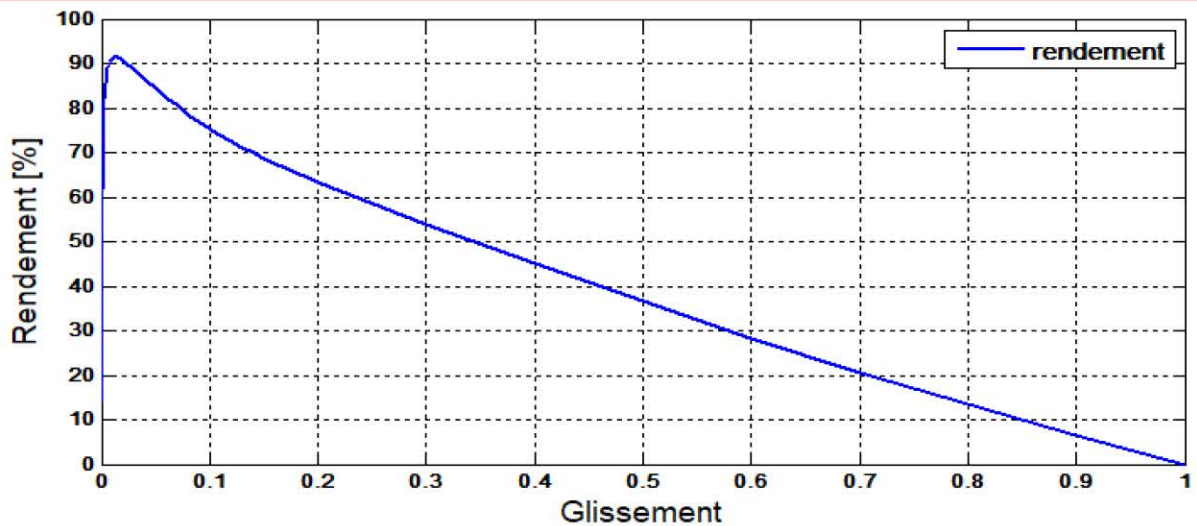


Figure II. 16 : Le rendement du moteur en fonction du glissement

Comparaison des résultats :

Le tableau II.3 présenté les caractéristiques principales du moteur 280-2 (du catalogue et calculs) avec une tension de 380v.

Comme nous pouvons le voir, les résultats de simulation sont très proches des valeurs expérimentales, mais on aura un légèrement différence se situe au niveau du courant de démarrage, le facteur de puissance et le rendement du moteur, en effet les valeurs de l'effets des extrémités utilisées au notre modèle sont des valeurs calculées. Donc celles-ci entraînés quelques écarts par rapport les valeurs réelles.

Figure II. 17 : caractéristiques électriques et mécaniques du moteur

Caractéristiques et	Valeurs du	Valeurs calculés	Unité
Tension nominale	380	380	V
Puissance nominale	75	76.7	KW
Courant nominal	140	138.65	A
Courant de démarrage/courant	6.3	6.14	/
Rendement	91.5	91.7	%
Facteur de puissance	0.89	0.86	/
Couple nominal	245	246.65	N.m
Couple de démarrage/couple	1.6	1.55	/
Vitesse nominale	2970	2970	Tr/min

II.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté tout d'abord le logiciel des éléments finis Flux 2d et la procédure suivie pour adapter le modèle de la machine asynchrone. Ensuite nous avons défini le moteur étudié et les

III.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons réalisé un modèle de simulation EF du moteur 280-2 dans l'environnement Flux2d. Nous avons tout d'abord alimenté le moteur avec la tension nominale 380V dans le but de valider les paramètres géométriques et physiques introduit dans le programme de simulation par la vérification des performances de fonctionnement du moteur.

Ce chapitre vient compléter le chapitre précédent avec une modification du bobinage du moteur. Nous avons tout d'abord introduit le changement dans le bobinage proposé par les ingénieurs du bureau d'étude de l'Electro-industries Azazga. Celui-ci consiste à modifier uniquement le nombre de conducteurs par encoche du moteur (au lieu de 15 c'est 17 conducteurs) en gardant la même section totale du cuivre dans l'encoche (même coefficient de remplissage de l'encoche). Le type et la configuration du bobinage restent les mêmes (Figure II.2).

Pour mettre en exergue la relation numérique entre l'entrefer les performances de fonctionnement globale de la machine, nous avons consacré la première partie une étude de l'influence de l'entrefer sur les performances de la machine.

La deuxième partie de ce chapitre concerne une étude large sur les différents types de bobinage, dans le but de mettre en avant le bobinage qui donne les meilleures performances du moteur.

III.2 Simulation du moteur 280-2 en fonction de l'épaisseur de l'entrefer :

Pour connaître l'influence de l'épaisseur de l'entrefer sur les performances du moteur modifié par les ingénieurs d'Electro-Industries, nous avons simulé le fonctionnement du moteur à vitesse nominale pour un entrefer qui varie entre 0.5mm et 4.5mm. Nous avons également simulé le fonctionnement du moteur à vitesse variable (0 à 2995tr/min) pour cinq différentes valeurs d'entrefer 0.5mm, 1mm, 2mm, 3mm, 4.5mm.

III.2.1 Variation de la valeur de l'entrefer à vitesse nominale

Nous avons imposé un glissement de 0.01 et tracé les différentes caractéristiques principales de fonctionnement du moteur. Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures ci-dessous.

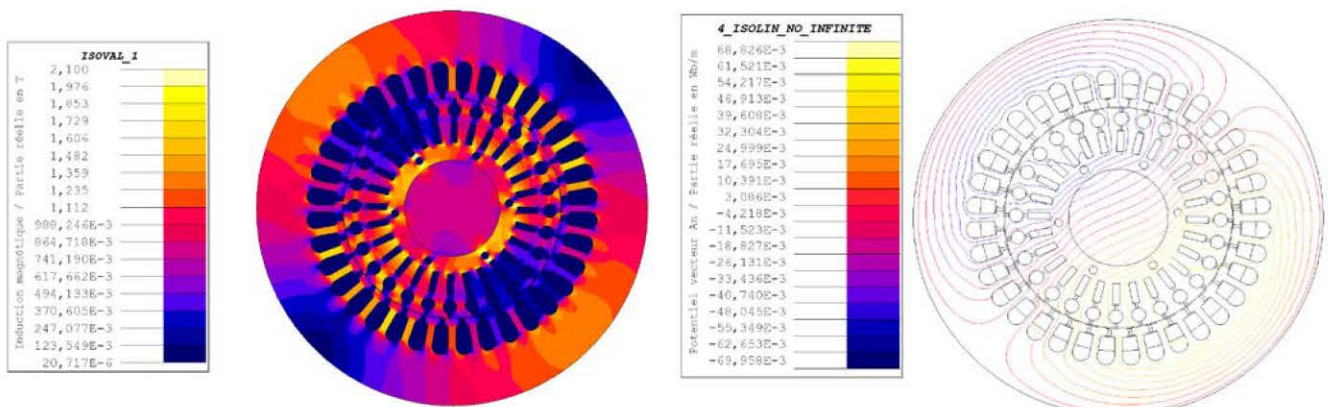


Figure III. 1: Répartitions de l'induction magnétique (gauche) et du potentiel vecteur magnétique (droite)

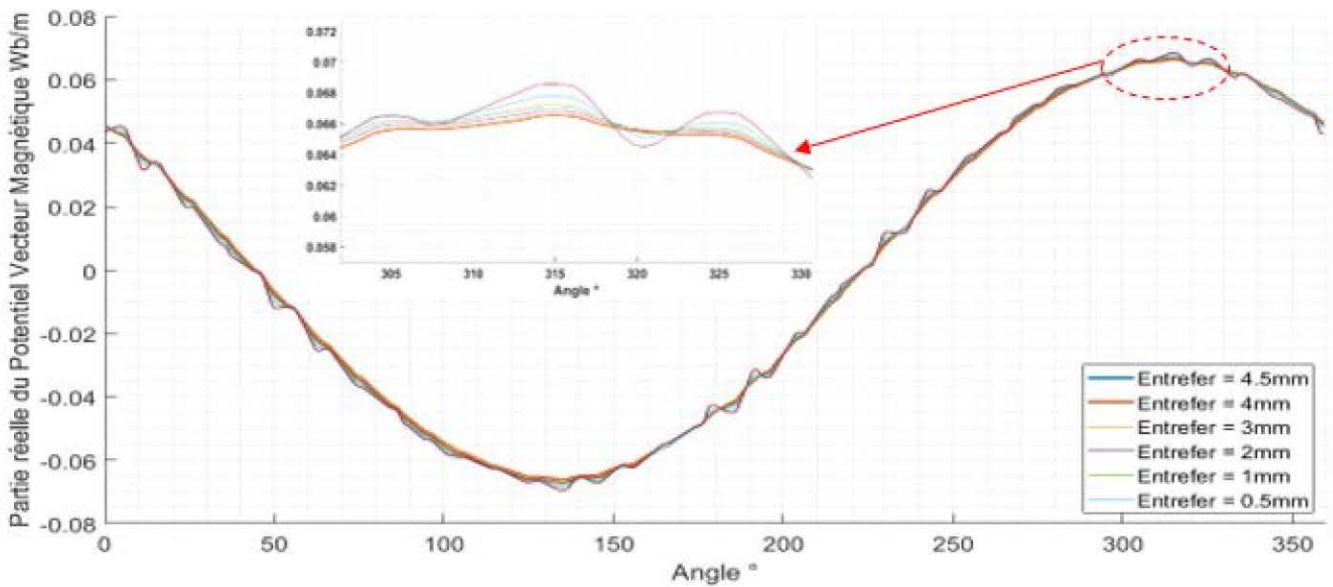


Figure III. 2: Partie réelle du potentiel vecteur magnétique le long de l'entrefer

La figure III.1 montre la répartition de la partie réelle de l'induction magnétique dans les régions magnétiques et entrefer et les lignes du potentiel vecteur magnétique. Ces dernières montrent bien la symétrie par rapport à la machine bipolaire. L'induction maximal de 2.1T, est enregistré dans les dents rotoriques. L'induction moyenne dans l'entrefer est d'environ 0.9T. Ceci réponds favorablement, aux contraintes imposées lors du dimensionnement de la machine.

La figure III.2 montre la forme de la courbe de la partie réelle du potentiel vecteur magnétique dans l'entrefer, en fonction de l'épaisseur de celui-ci.

Nous remarquons que la forme de cette courbe est de plus en plus déformée (loin de la sinusoïde ou riche en harmoniques) pour les valeurs de l'épaisseur de l'entrefer de plus en plus faible.

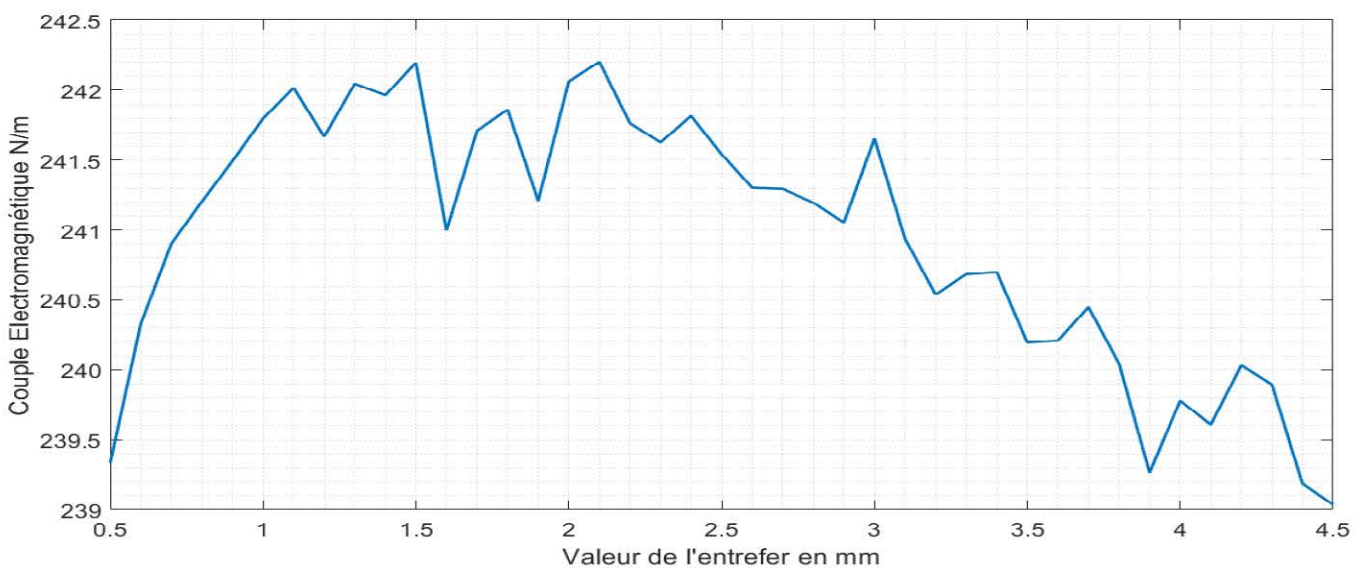


Figure III. 3: Evolution du couple électromagnétique en fonction de l'épaisseur de l'entrefer

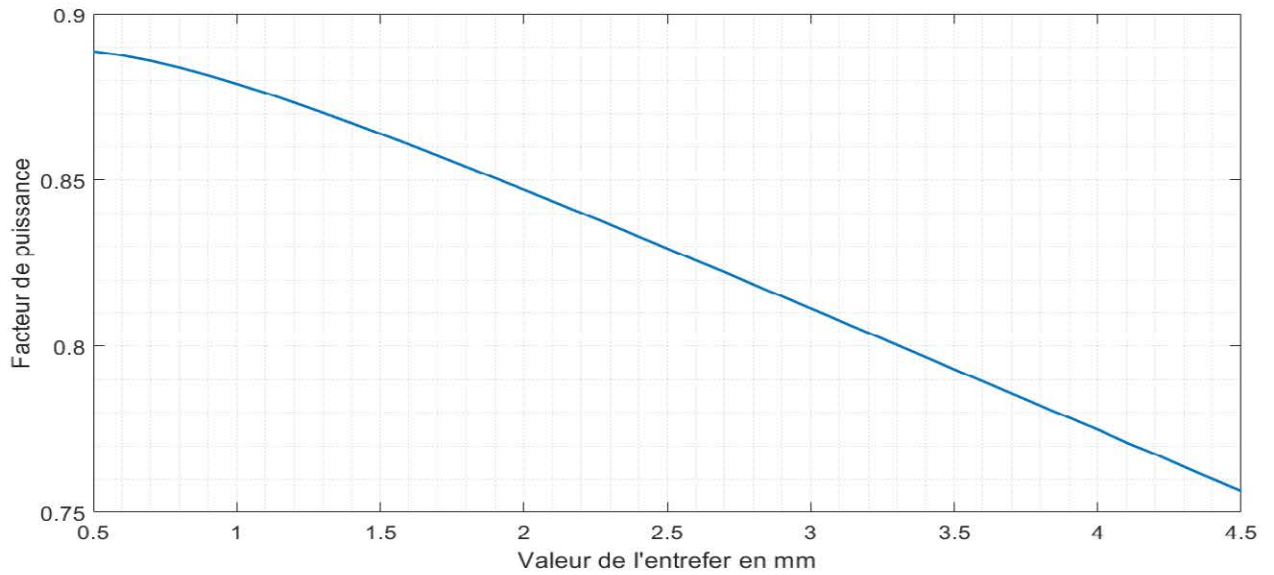


Figure III. 4: Evolution du facteur de puissance en fonction de l'épaisseur de l'entrefer

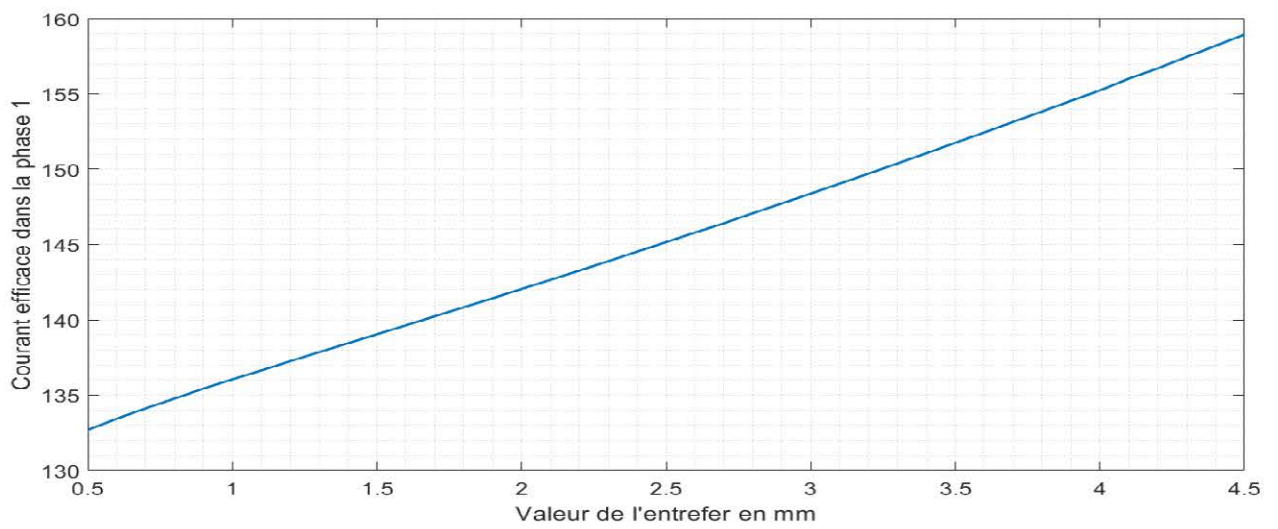


Figure III. 5 : Evolution du courant de phase en fonction de l'épaisseur de l'entrefer

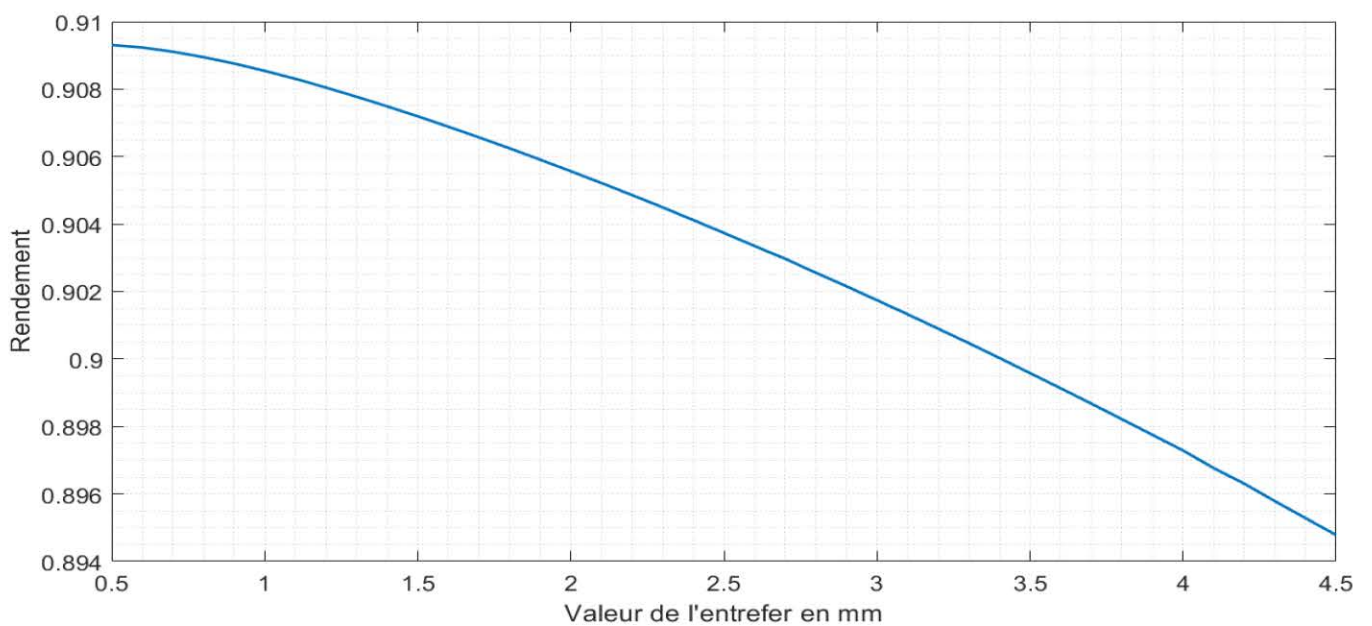


Figure III. 6: Evolution du rendement en fonction de l'épaisseur de l'entrefer

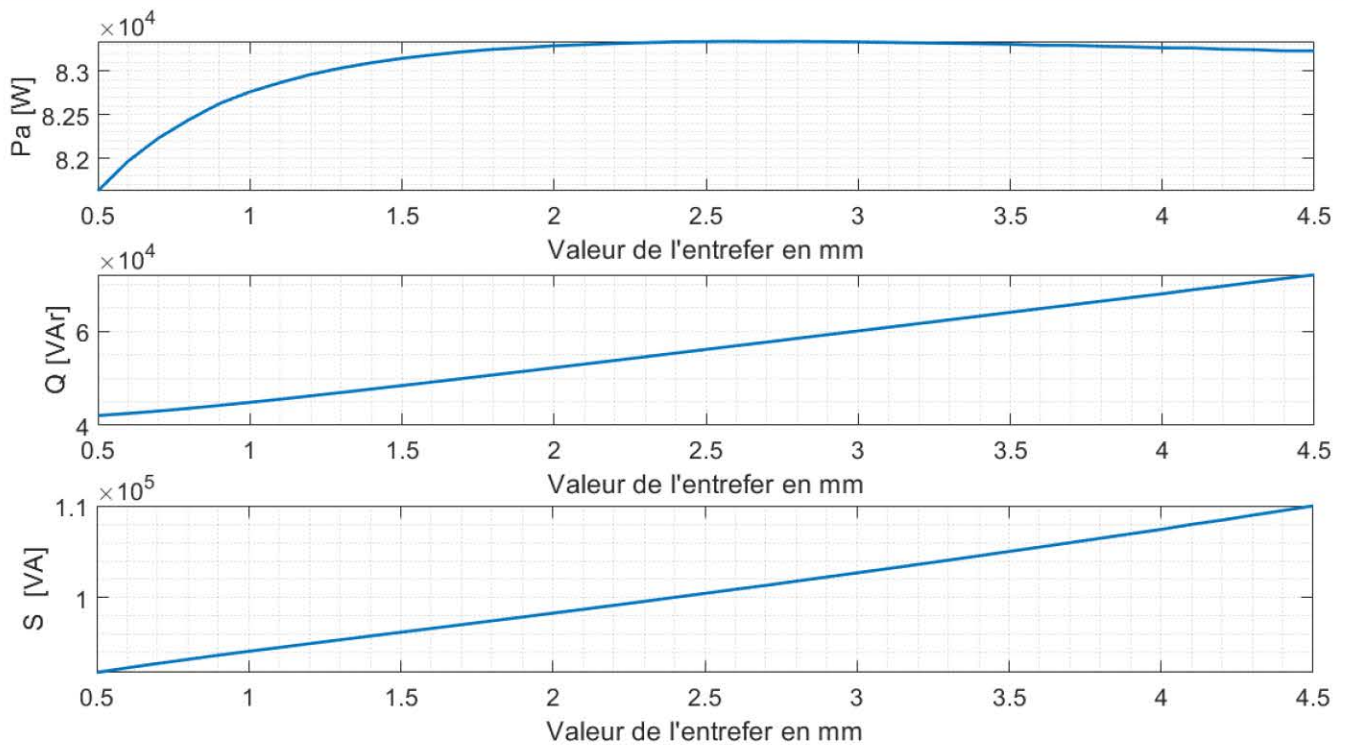


Figure III. 7: Evolution des puissances active, réactive et apparente en fonction de l'épaisseur de l'entrefer

La figure III.3 montre l'évolution du couple électromagnétique en fonction de l'épaisseur de l'entrefer. La forme de la courbe est parabolique, la valeur maximale est obtenue entre 1mm et 2mm de la valeur de l'entrefer.

La figure III.4 montre l'évolution du facteur de puissance du moteur en fonction de l'épaisseur de l'entrefer. Celui-ci augmente (devient meilleur) avec la diminution de la valeur de l'entrefer.

La figure III.5 montre l'évolution du courant de phase en fonction de l'épaisseur de l'entrefer. On remarque que le courant augmente avec l'augmentation de la valeur de l'entrefer. Ceci est une conséquence directe de la demande du moteur en puissance réactive (Figure III.7) pour créer le champ magnétique nécessaire.

La figure III.6 montre l'évolution du rendement du moteur en fonction de la valeur de l'entrefer. Il diminue légèrement avec l'augmentation de la valeur de l'entrefer. Ceci-ci est dû à l'augmentation des pertes Joules, donc de la puissance absorbée (Figure III.7), cette augmentation est essentiellement due à l'augmentation du courant absorbée par le moteur.

III.2.2 Variation de la vitesse du moteur à différentes valeurs de l'entrefer

Afin d'illustrer l'influence de l'épaisseur d'entrefer sur les performances du moteur 280-2 dans les différents régimes de fonctionnement, le moteur est simulé en régime magnéto-harmonique avec cinq valeurs de l'épaisseur de l'entrefer 0.5mm, 1mm, 2mm, 3mm, 4.5mm.

Les Figures III.8, III.9, III.10, III.11 et III.12 montrent l'évolution des couples électromagnétiques, des courants, des puissances absorbées, des facteurs des puissances et des rendements du moteur étudié en fonction du glissement pour les différents valeurs d'entrefer.

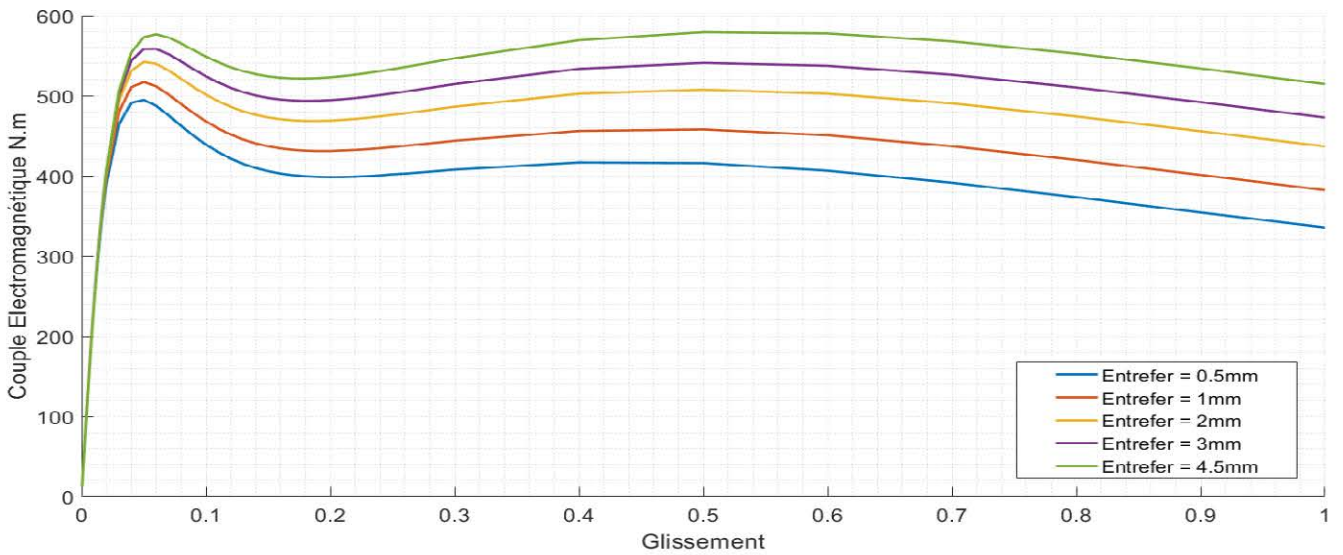


Figure III. 8: L'évolution des couples électromagnétiques en fonction du glissement pour plusieurs valeurs de l'entrefer

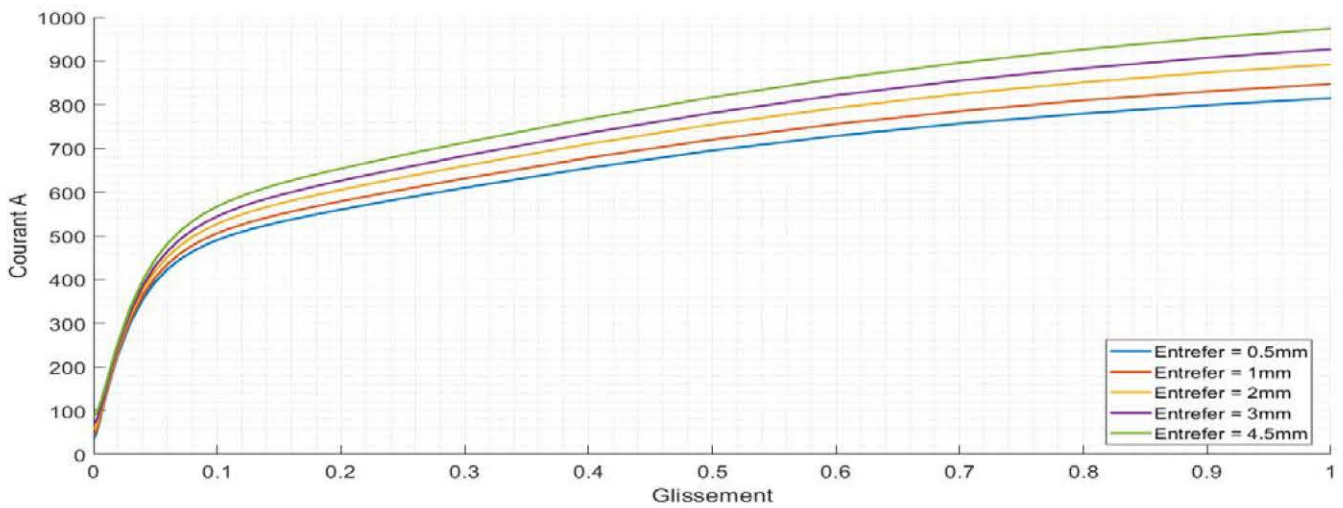


Figure III. 9: L'évolution des courants en fonction du glissement pour plusieurs valeurs de l'entrefer

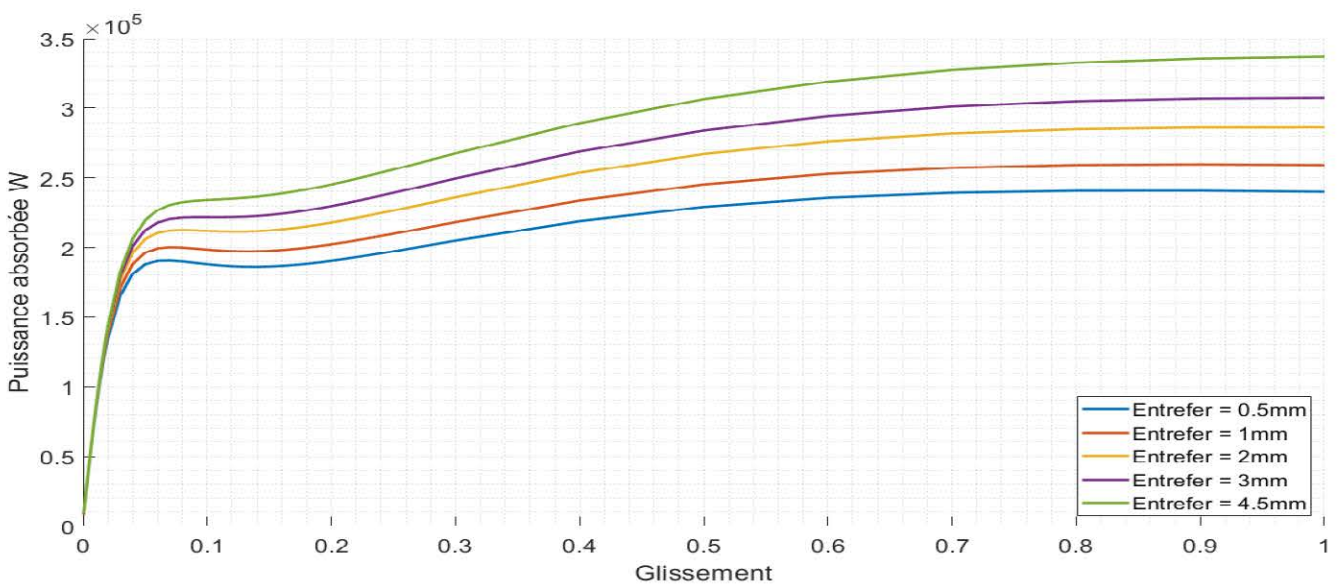


Figure III. 10: L'évolution des puissances absorbées en fonction du glissement pour plusieurs valeurs de l'entrefer

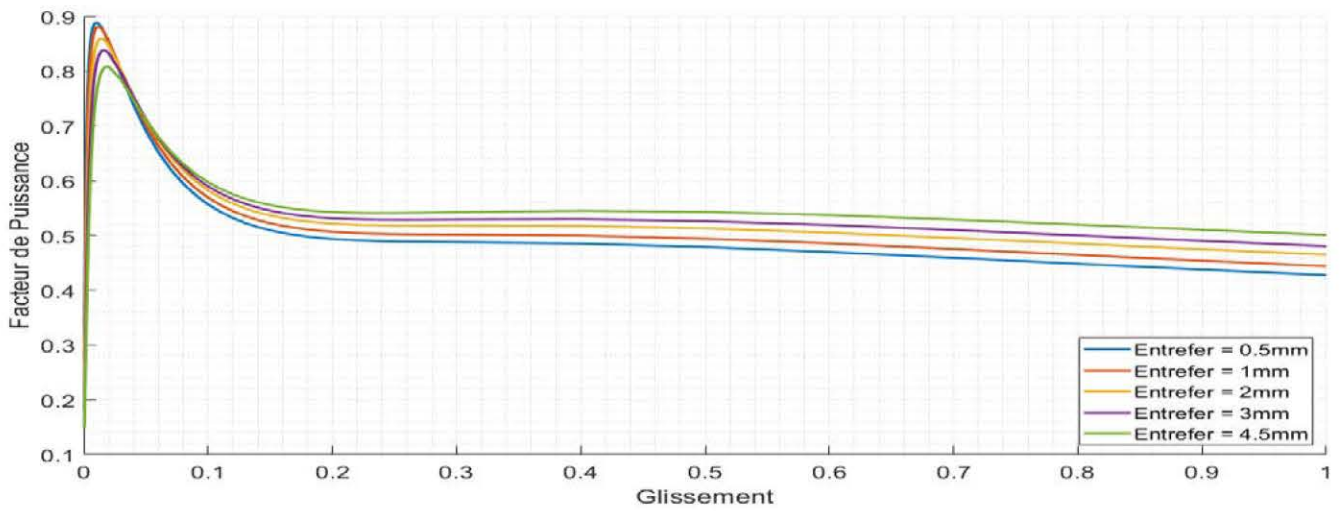


Figure III. 11: L'évolution des facteurs des puissances en fonction du glissement pour plusieurs valeurs de l'entrefer

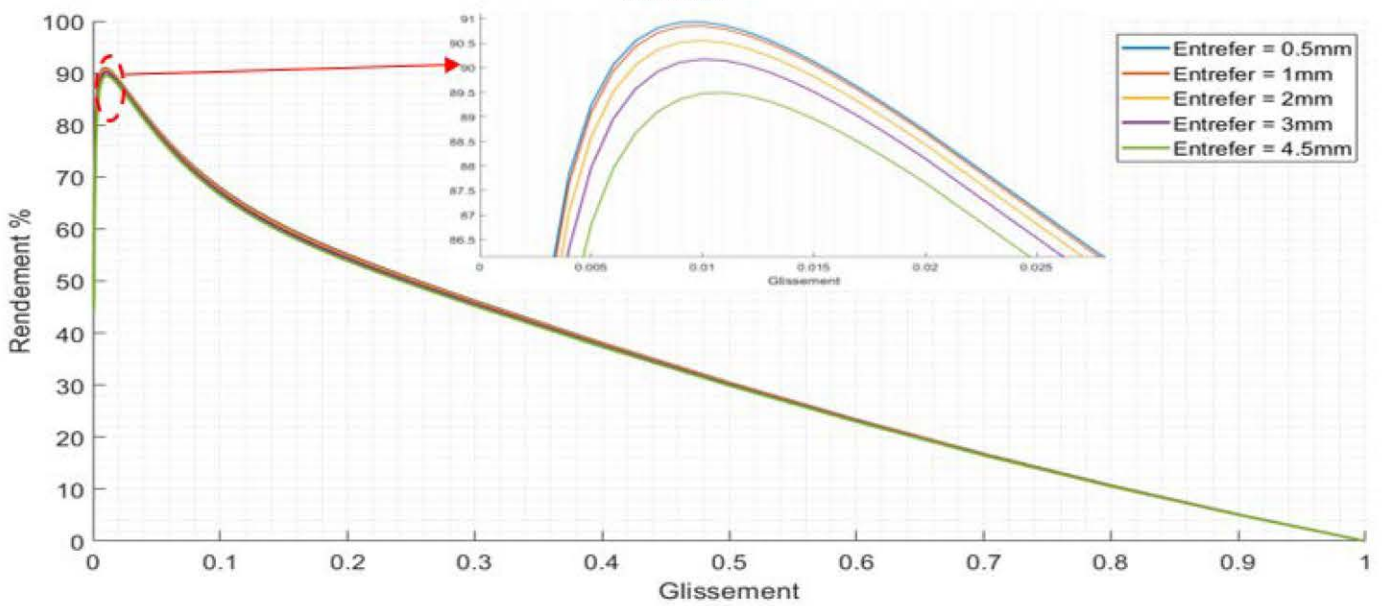


Figure III. 12 : L'évolution des rendements en fonction du glissement pour plusieurs valeurs de l'entrefer

Tableau III. 1: Caractéristiques et performances principales pour les cinq valeurs d'entrefer

Caractéristiques et performances	Epaisseur de l'entrefer					Unité
	0.5 mm	1 mm	2 mm	3 mm	4.5 mm	
Courant nominal	132.53	135.88	141.9	148.25	158.80	A
Rendement	90.90	90.85	90.55	90.17	89.48	%
Facteur de puissance	0.888	0.878	0.847	0.811	0.756	/
Couple nominal	239.10	241.5	241.79	241.38	238.77	N.m
I_d/I_n	6.15	6.24	6.28	6.23	6.14	/
C_d/C_n	1.40	1.58	1.80	1.96	2.15	/
C_{max}/C_n	2.05	2.14	2.24	2.31	2.41	/

Pour synthétiser les résultats obtenus dans cette sous-section (III.2.2), nous avons construit un tableau (Tableau III.1) dans lequel nous avons inscrit les valeurs caractéristiques du moteur (Couple, Courant, $\cos\phi$, Rendement, C_d/C_n , I_d/I_n et C_{max}/C_n).

Le tableau III.1 montre que l'augmentation d'épaisseur de l'entrefer a engendré une diminution pour certaines performances du moteur et augmentation pour d'autres :

Chaque fois on augmente l'épaisseur de l'entrefer de 0.5mm jusqu'à 4.5mm le courant absorbé par phase s'est augmenté pendant de tous les régimes des fonctionnements (du démarrage ($g=1$) au fonctionnement établi).

Ce constat est également illustré par le rapport I_d/I_n

Le rapport C_d/C_n augmente avec l'augmentation de la valeur de l'entrefer. Comme le couple nominal varie légèrement avec la variation de l'entrefer (figure III.3 et figure III.8), c'est alors le couple de démarrage qui a augmenté avec l'augmentation de la valeur de l'entrefer.

L'évolution du rapport C_{max}/C_n montre que le couple max augmente avec l'augmentation de l'entrefer comme le montre également la figure III.8.

III.3 Simulation en régime transitoire

Pour voir le comportement temporel du moteur modifié, nous avons fait une simulation en régime dynamique d'une durée d'une seconde avec un pas de simulation de 2ms. Le démarrage est effectué sans charge ($C_r=0$). Nous avons appliqué un couple résistant $C_r=241\text{Nm}$ à $t=0.4\text{s}$, et nous avons à nouveau remis le couple résistant à 0 à $t=0.8\text{s}$. La Figure III.13 montre la variation des courants de phases dans ce régime.

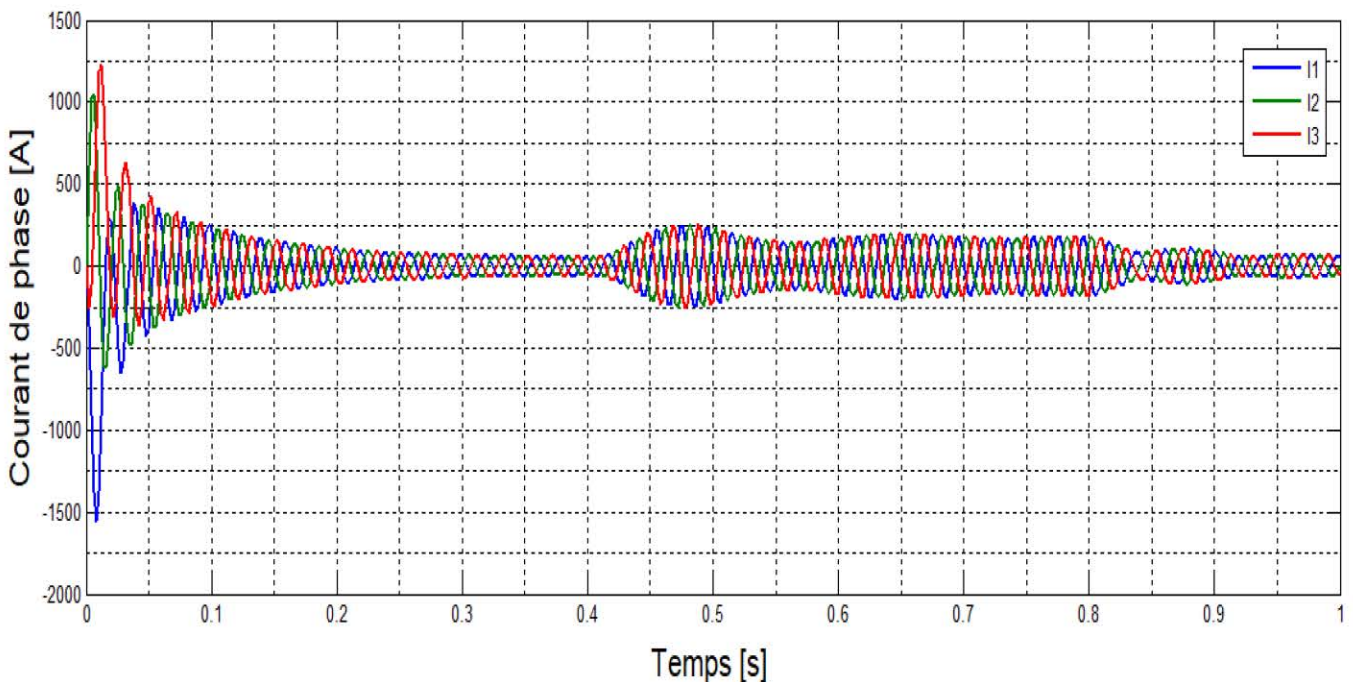


Figure III.13: variation des courants des phases en fonction du temps

III.4 Configurations étudiées du bobinage pour le moteur 280-2

Cette partie est réalisée afin de montrer l'influence du type et la configuration du bobinage du moteur sur ses performances. Nous avons proposé cinq configurations de bobinage : le bobinage concentrique, le bobinage concentrique imbriqué 2 par 3, le bobinage imbriqué sans raccourcissement (diamétral), le bobinage imbriqué avec raccourcissement et le bobinage concentrique simple/double couche. La description de chacun des bobinages est présentée ci-après.

III.4.1 Bobinage concentrique

Dans ce cas on revient à un bobinage entièrement concentrique. Comme le moteur 280-2 est un moteur triphasé bipolaire de 36 encoches ($m=3$, $P=1$ et $Z=36$), alors le nombre d'encoche occupé par pôle et par phase donné par :

$$q = \frac{Z}{2Pm} = 6$$

C'est à dire chaque bobine contient six section concentrique et occupée 12 demi encoche (six pour les conducteur allés et six pour les conducteurs retours).

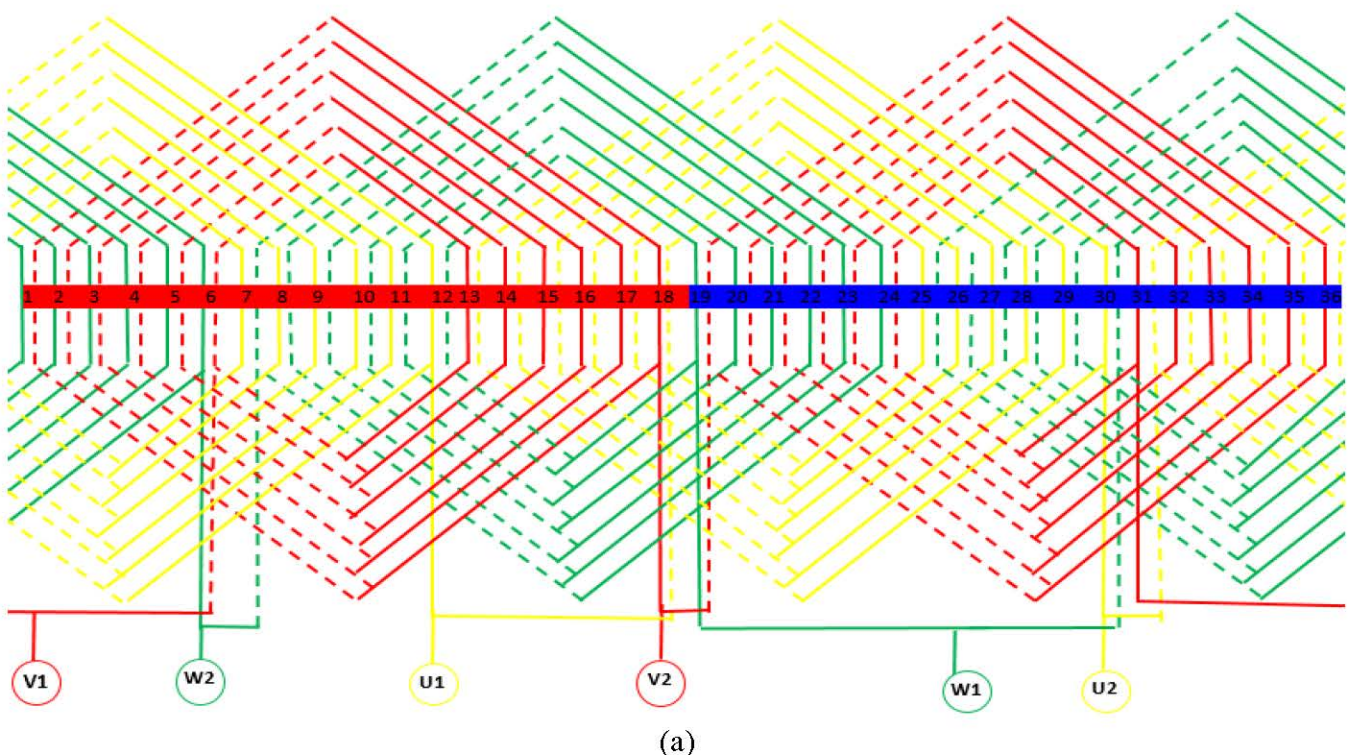
Le pas polaire donné comme suit :

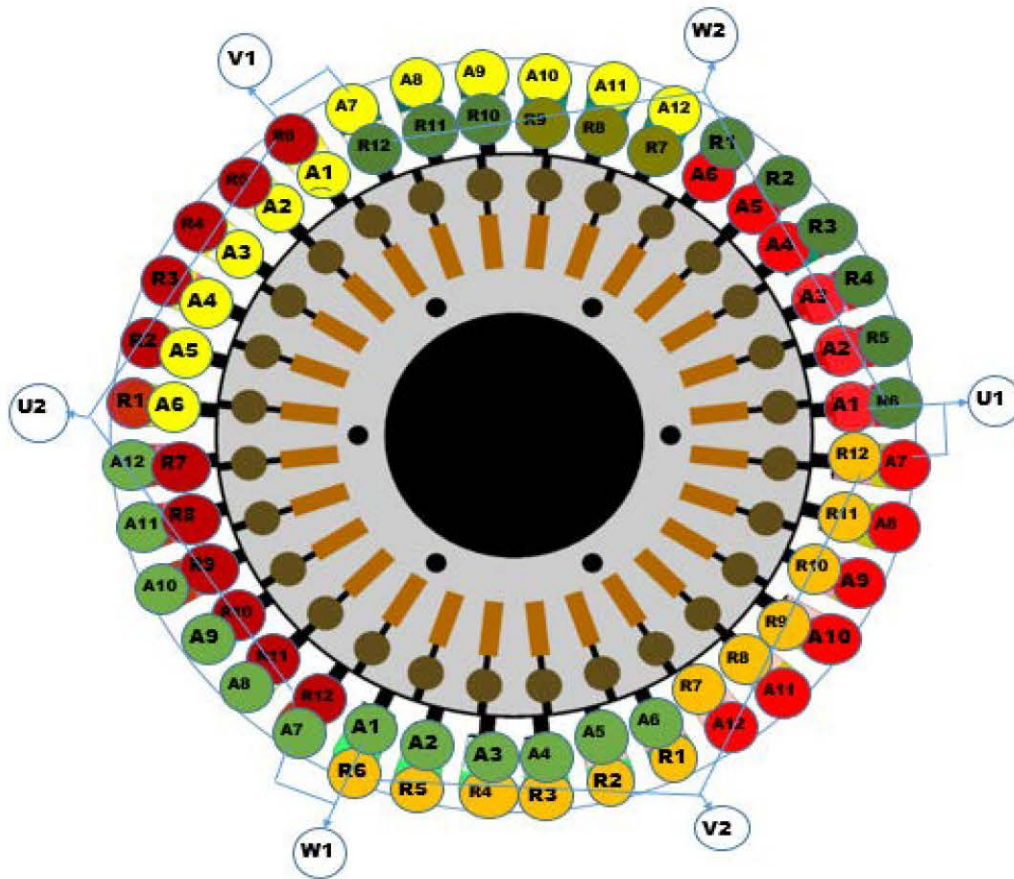
$$\tau = \frac{Z}{2P} = 18$$

Le bobinage utilisé est un bobinage à deux couches, donc chaque phase occupe $\frac{2Z}{3} = 24$ demi encoche.

Donc en deux bobines par phase connectées en parallèle.

A partir de là, on peut tracer le schéma développé au long de l'entrefer et traduire en schéma circulaire pour implémenter dans le logiciel Flux2d (Figure III.14).

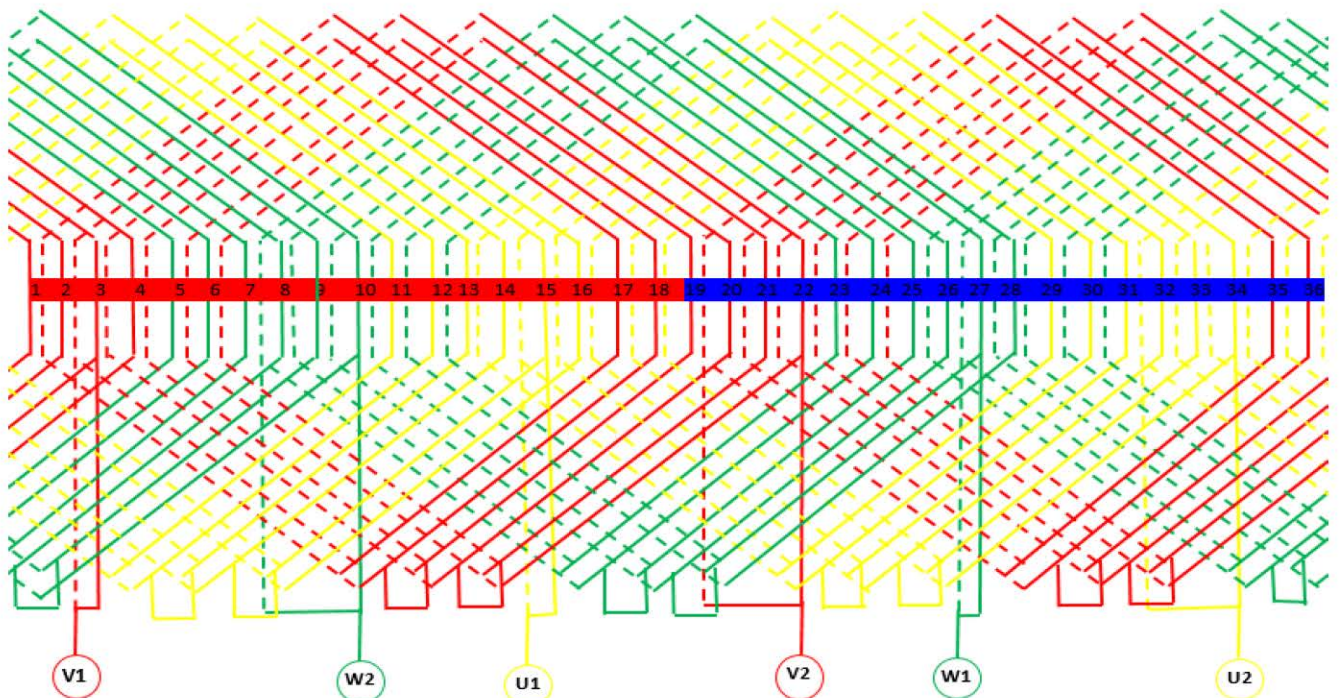




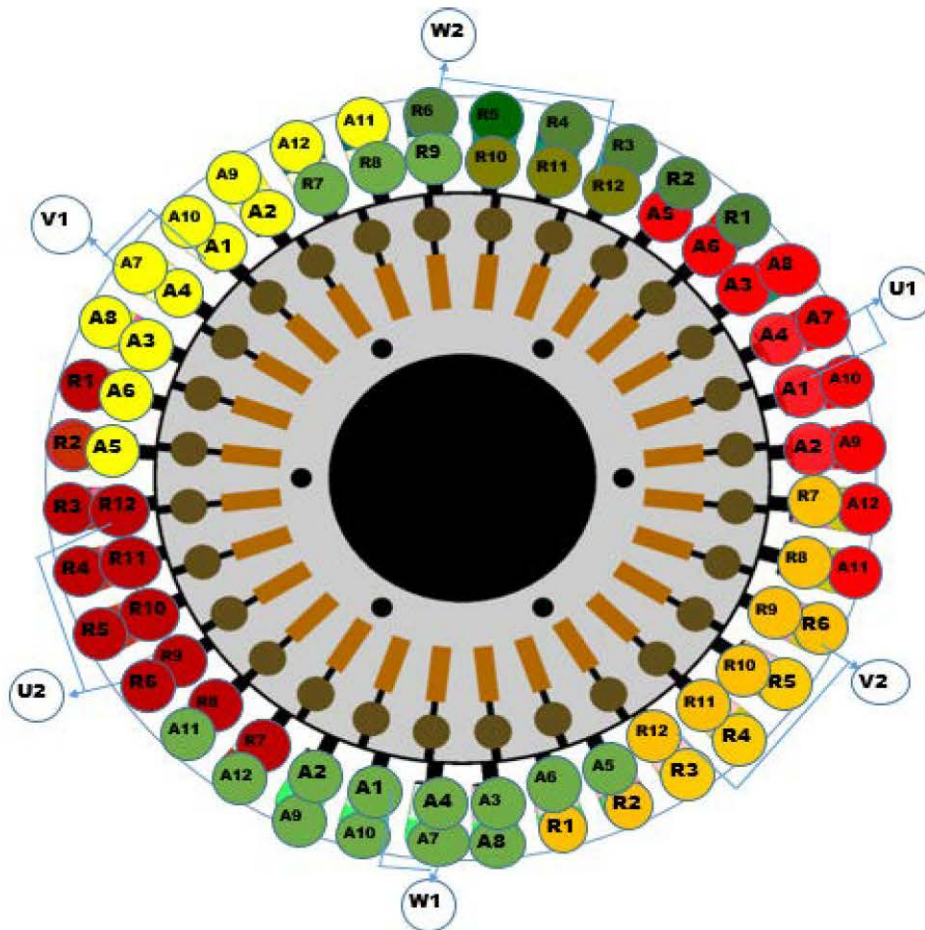
(b)

Figure III. 14: Bobinage concentrique :(a) schéma développé plan, (b) schéma circulaire

III.4.2 Bobinage concentrique Imbriqué 2 par 3



(a)



(b)

Figure III. 15: Bobinage concentrique imbriqué 2 par 3 : (a) schéma développé plan, (b) schéma circulaire

Nous continuons avec la démarche proposée par les ingénieurs de l'Electro-industries. Donc afin de réduire un peu plus les têtes des bobines, nous avons répartie chaque bobine sur trois sous-bobines, chaque sous-bobine est composée de deux sections concentriques, ensuite les trois sous-bobines sont connectées en séries. L'avantage de plus de cette configuration permet de réaliser un pas raccourci (16/18) différent de celle utilisée dans la configuration du bobinage initial (Figure II.2).

Le nombre d'encoche occupé par pôle et par phase reste égale à 6. Ainsi que le nombre de demi-encoches occupé pour chaque phase est toujours égal à 24.

La Figure III.15 présente le schéma développé plan et le schéma circulaire pour faciliter l'implémentation du bobinage dans le logiciel Flux2d.

III.4.3 Bobinage imbriqué sans raccourcissement (diamétral)

La catégorie du bobinage imbriqué, est composée de bobines à sections identiques (même pas entre conducteurs allé et conducteurs retour). On choisit particulièrement un bobinage à pas diamétral pour pouvoir faire une comparaison avec le bobinage à pas raccourci (bobinage de la partie suivante). Les paramètres essentiels sont :

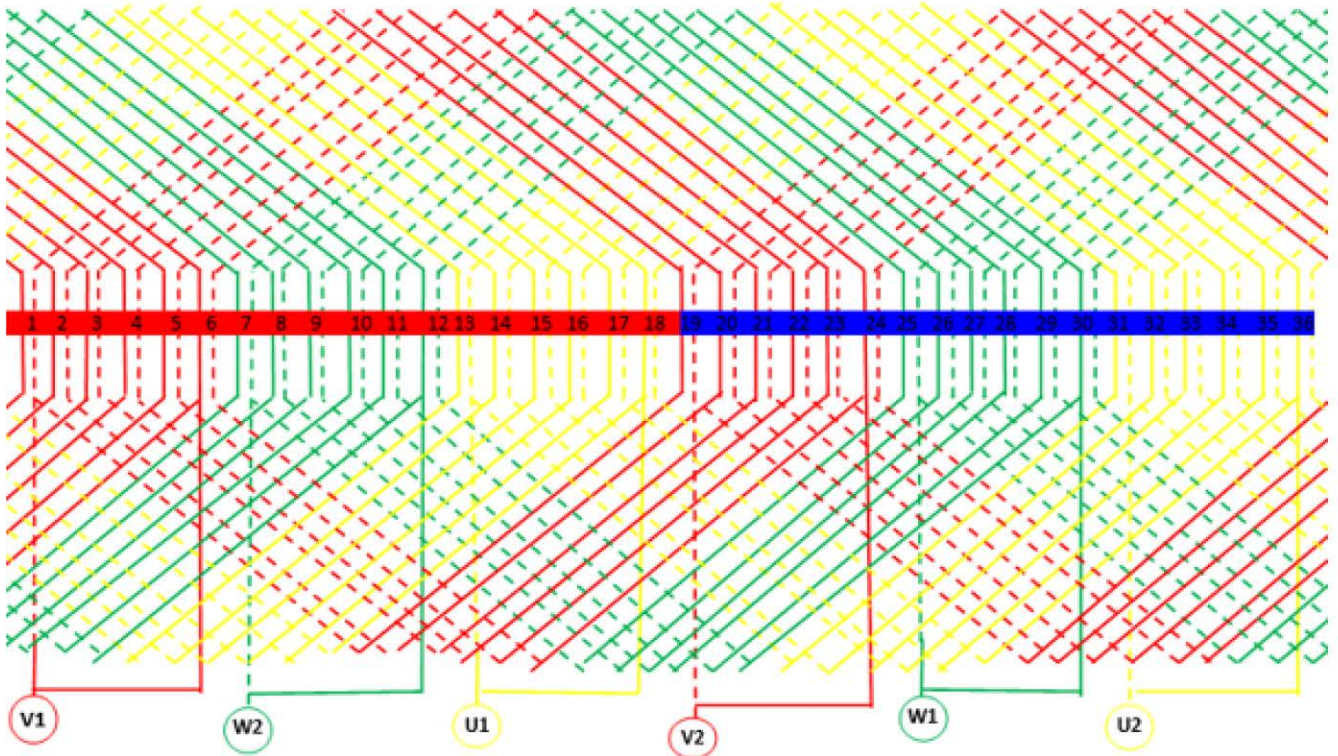
Le nombre d'encoche occupé par pole et par phase donné par :

$$q = \frac{Z}{2Pm} = 6$$

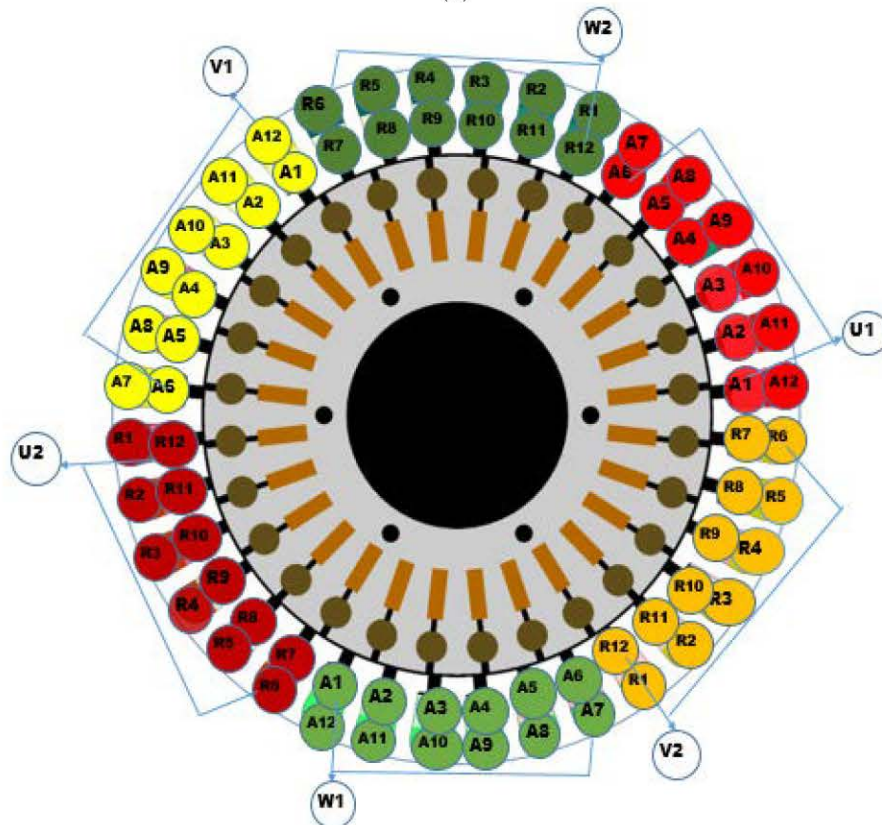
Le pas polaire :

$$\tau = \frac{Z}{2P} = 18$$

Le nombre des demi-encoches occupé pour chaque phase est toujours égale 24. Chaque phase contient deux bobines à six sections. Ces bobines sont connectées en parallèle, comme illustré sur la Figure III.16.



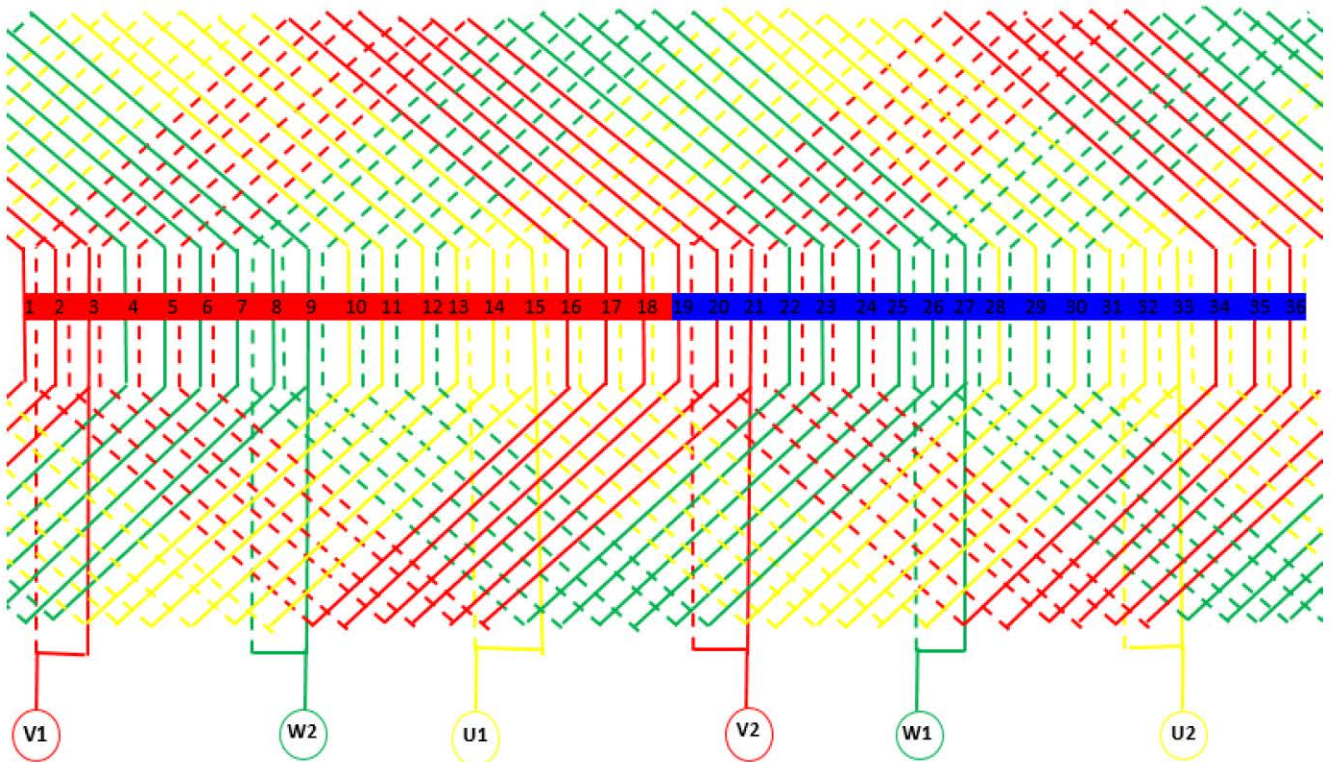
(a)



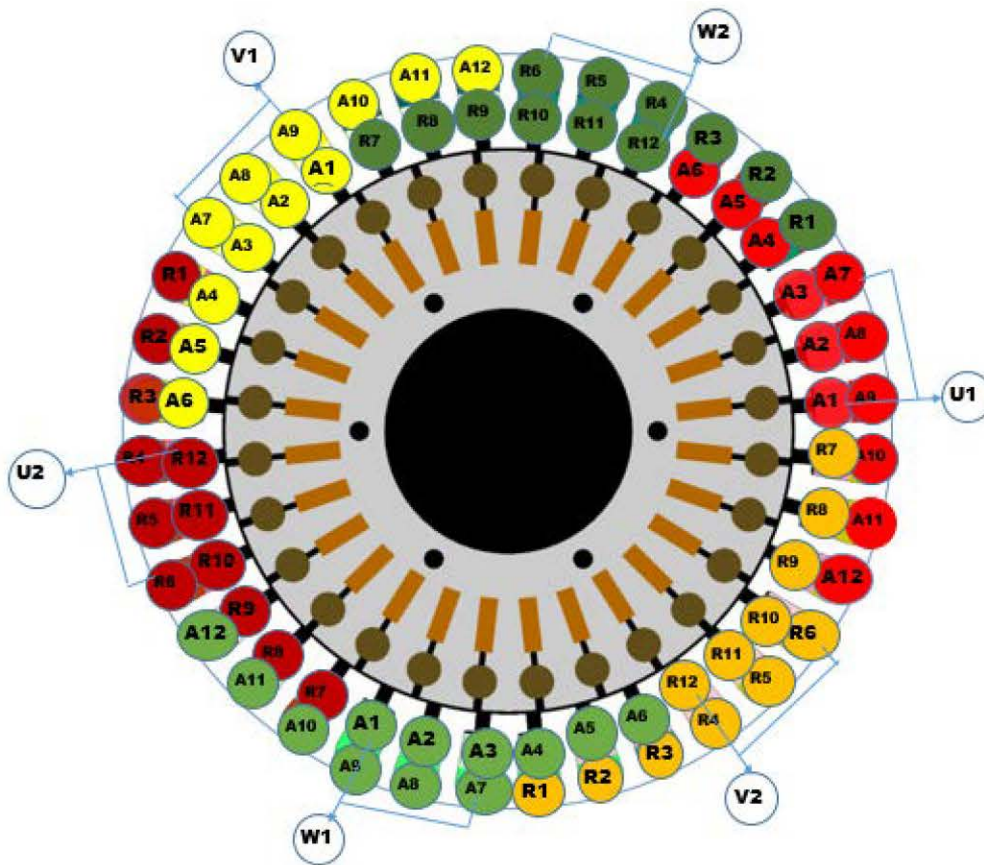
(b)

Figure III.16: Bobinage imbriqué :(a) schéma développé plan, (b) schéma circulaire

III.4.4 Bobinage imbriqué raccourci



(a)



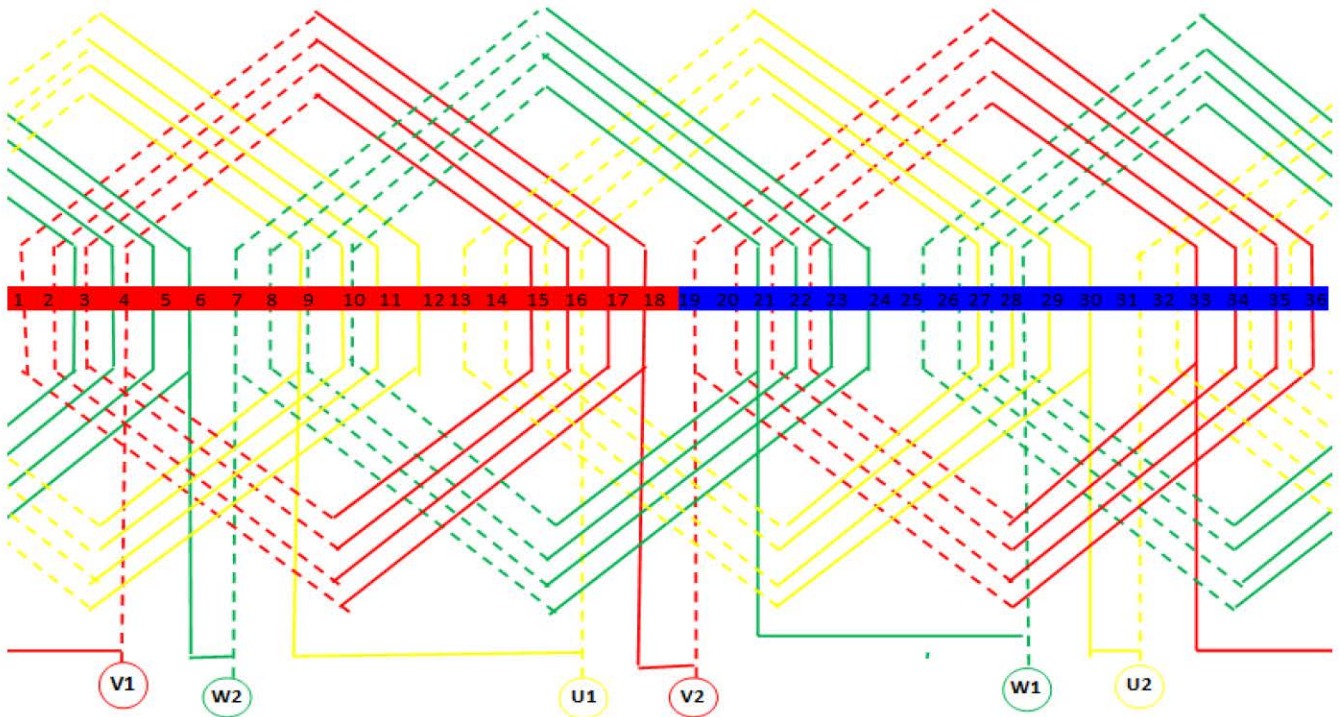
(b)

Figure III. 4: Bobinage imbriqué raccourci :(a) schéma développé plan, (b) schéma circulaire

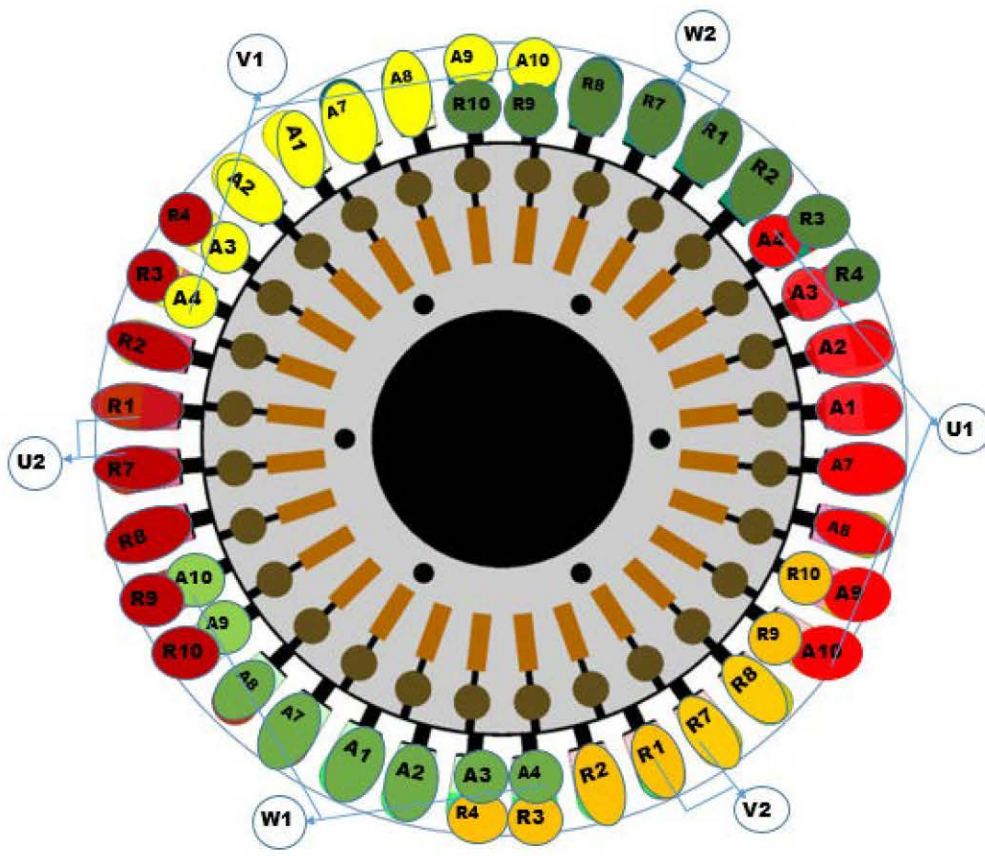
Cette configuration de bobinage résulte du raccourcissement du bobinage précédant (bobinage imbriqué diamétral), on utilise le raccourcissement le plus répondu qui est de valeur $5/6$ ($15/18$).

La Figure III.17 présente le schéma développé plan et le schéma circulaire pour faciliter l'implémentation dans le logiciel Flux2d du bobinage imbriqué raccourci.

III.4.5 Bobinage concentrique simple-double



(a)



(b)

Figure III. 5: Bobinage concentrique simple-double couche : (a) schéma développé plan, (b) schéma circulaire

Dans ce cas nous avons utilisé un type spécial d'bobinage trouvé dans les littératures [24] [25]. c'est bobinage concentrique fractionnaire qui est partiellement monocouche et partiellement double couche (Figure III.18). Les avantages sont une plus petite masse de cuivre inséré en raison des extrémités d'enroulement les plus courtes et également des contenus plus faibles d'harmoniques plus élevés dans le champ magnétique du moteur

III.5 Résultats de simulation des types et configurations de bobinage :

L'ensemble des bobinages présentés dans la section précédente ont été implémenté sous Flux2D pour le moteur asynchrone bipolaire, 75kW.

Le moteur est simulé en régime magnéto-harmonique pour différents glissement (0 à 1).

Comme nous somme dans le même contexte d'étude que pour la section II.2, c.-à-d. l'étude des performances du moteur en fonctions de sa conception. Nous allons présenter l'évolution des caractéristiques obtenues (Couple, Courant, $\cos\phi$, Rendement, C_d/C_n , I_d/I_n et C_{max}/C_n), sous forme de courbes avec une synthèse dans le tableau III.2. Nous avons comparé les cinq types ou configurations de bobinage proposés au bobinage étudié dans le chapitre II et dans la section III.2 que nous avons nommé, bobinage concentrique imbriqué 3/2.

Les Figures III.19 montre l'évolution de la partie réelle du potentiel vecteur magnétique le long de l'entrefer.

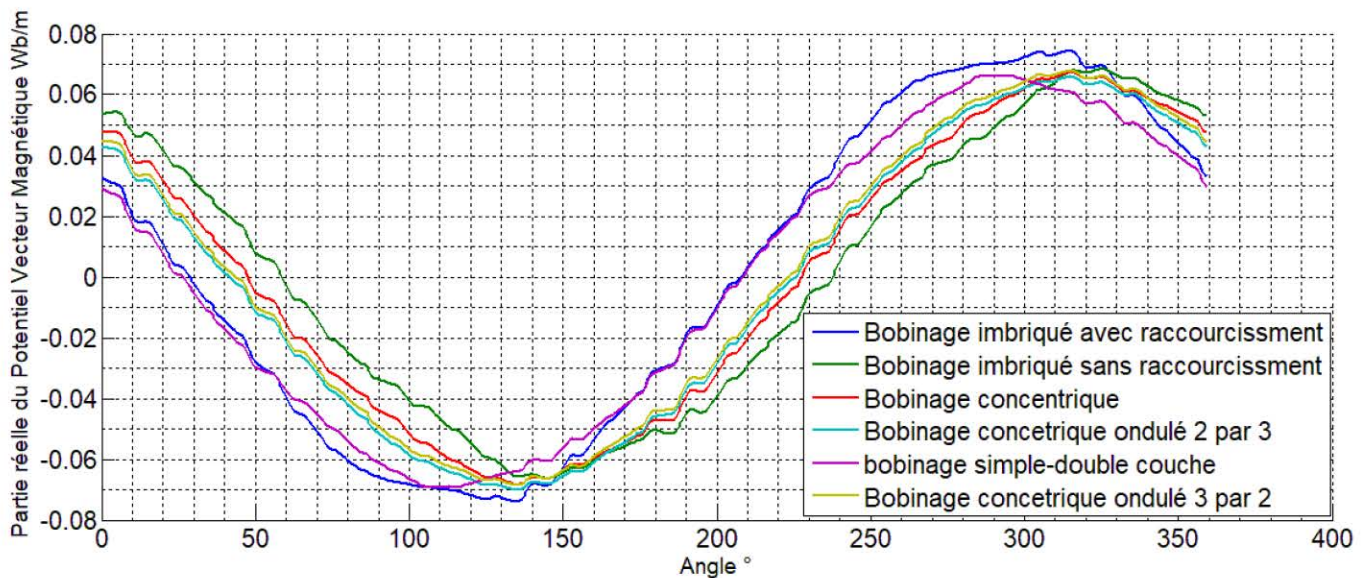


Figure III. 6: Evolution du potentiel vecteur magnétique le long d'entrefer pour les six types des bobinage

La figure III.19 montre la forme de la courbe de la partie réelle du potentiel vecteur magnétique dans l'entrefer pour les six types des bobinages.

Nous remarquons que la forme les courbes dans le cas des bobinages concentrique, concentrique Imbriqué 2 par 3, concentrique imbriqué 3 par 2, et le bobinage concentrique simple/double couche est très proche

de la forme sinusoïdale (harmoniques faibles). Particulièrement, le bobinage concentrique simple/double couche présente moins d'oscillations par rapport aux autres types de bobinages.

Les bobinages imbriqués présentent des déformations importantes de la force magnétomotrice dans l'entrefer (ou potentiel vecteur magnétique), surtout dans le cas du bobinage imbriqué non raccourci.

Les Figures III.20 jusqu'à III.24 présentent respectivement l'évolution des couples électromagnétiques, des courants, des puissances absorbées, des facteurs des puissances et des rendements du moteur 280-2 en fonction du glissement pour les six configurations des bobinages.

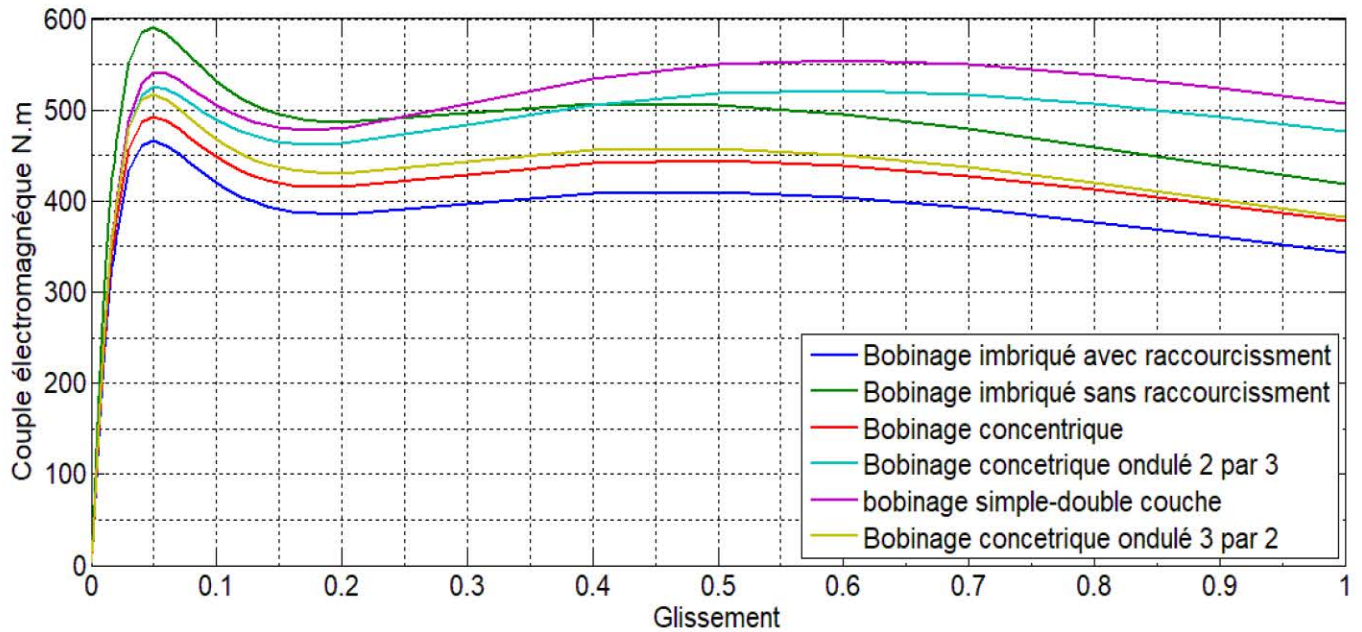


Figure III. 20 Evolution des couples électromagnétiques en fonction du glissement pour les six configurations des bobinages

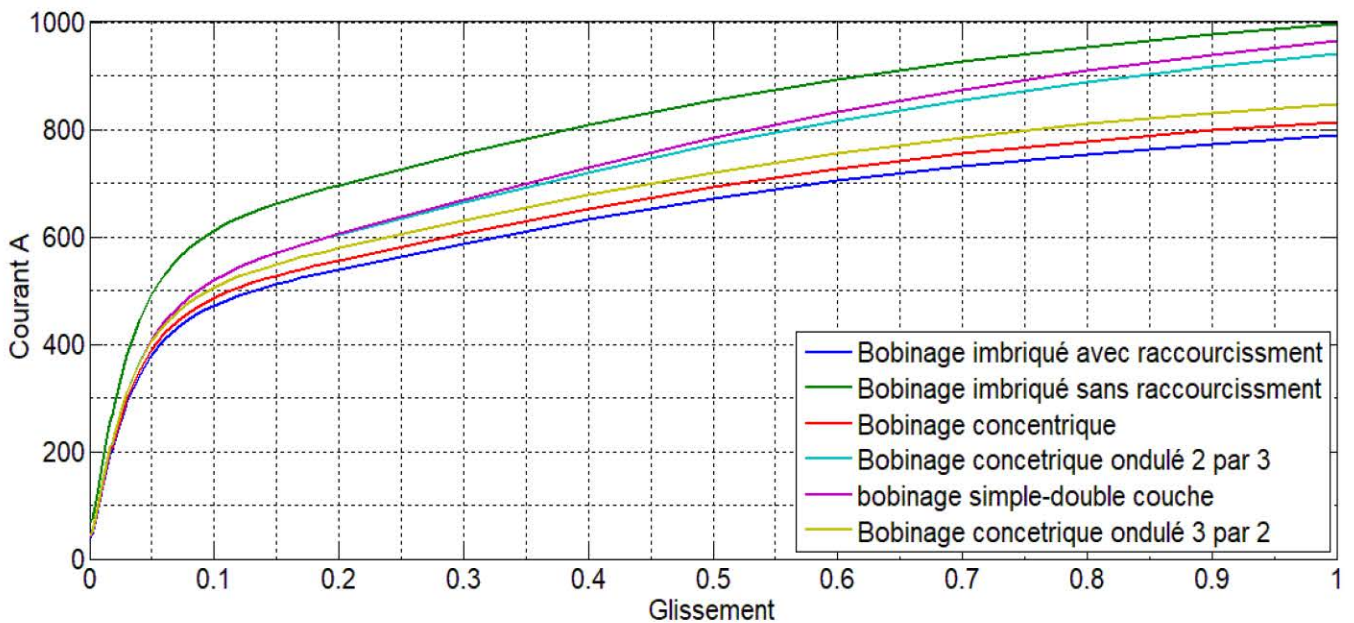


Figure III. 7: L'évolution des courants des phases en fonction du glissement pour les six configurations des bobinages

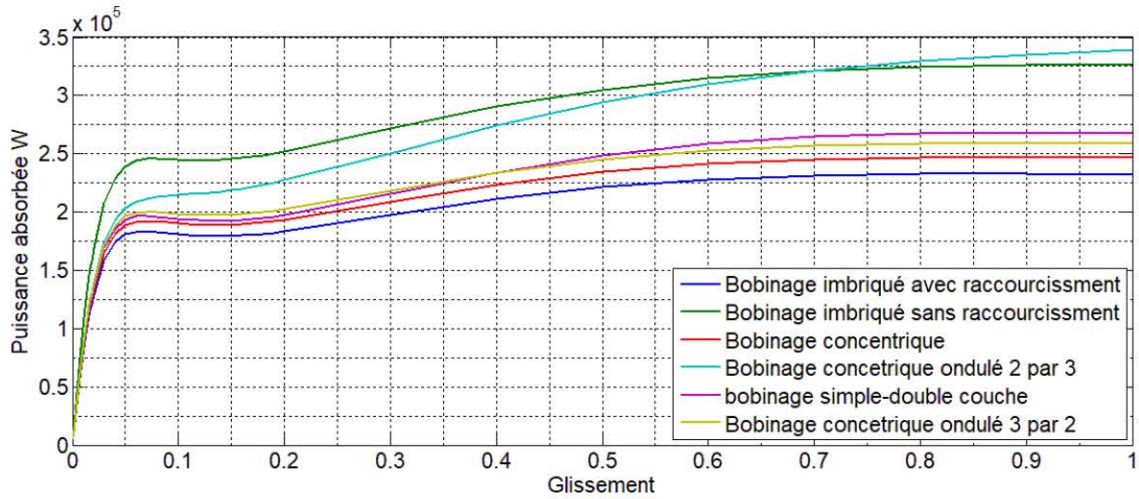


Figure III. 8: Evolution des puissances actives absorbées des phases en fonction du glissement pour les six configurations des bobinages

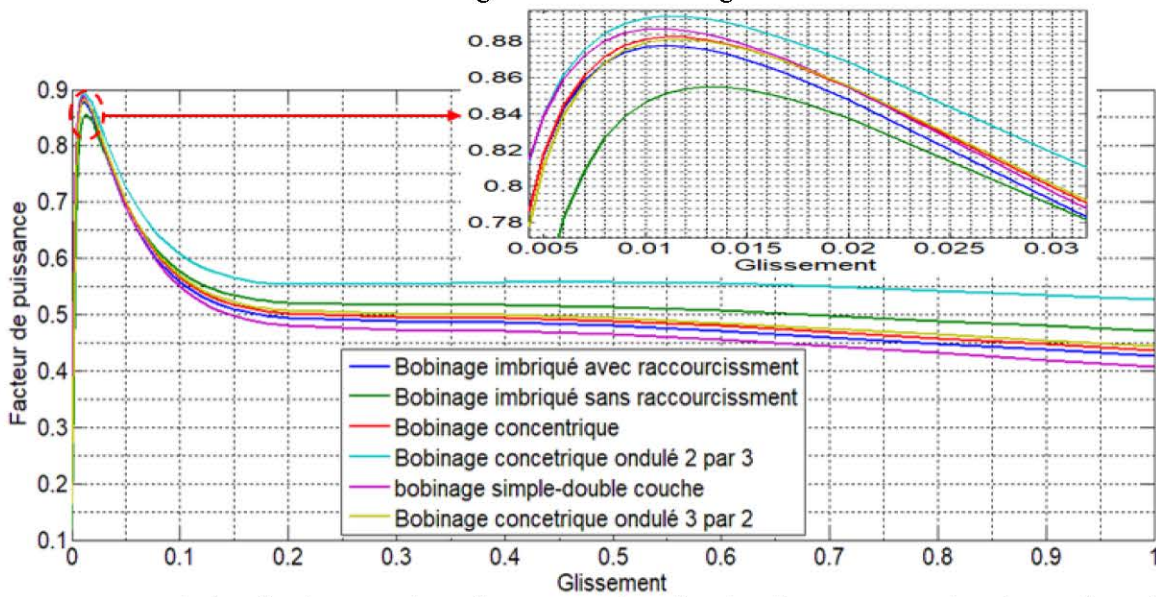


Figure III. 9 : L'évolution des facteurs des puissances en fonction du glissement pour les six configurations des bobinages

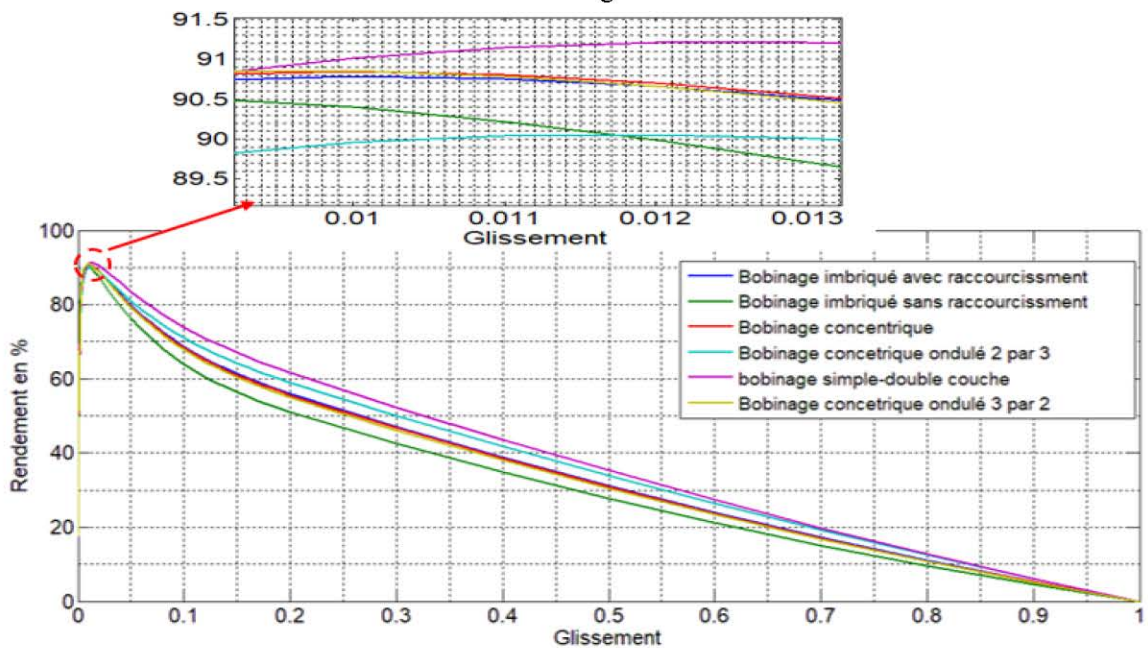


Figure III. 10: Evolution des rendements en fonction du glissement pour les six configurations des bobinages

Tableau III.2 : Caractéristiques et performances principales pour les six valeurs d'entrefer

Bobinage \ Performances	Concentrique Imbriqué 3par 2	Concentrique	Concentrique Imbriqué 2par 3	Imbriqué Diamétral	Imbriqué raccourci	Concentrique simple- double couche	Unité
Courant nominal	135.88	130.99	136.49	127.60	171.42	133.14	A
I_d/I_n	6.24	6.21	6.8	6.18	5.81	7.2	/
Rendement	90.85	90.08	89.99	90.80	90.40	91.02	%
Facteur de puissance	0.878	0.889	0.893	0.877	0.846	0.887	/
Couple nominal	241.5	232.5	241.40	221.6	290.1	240.45	N.m
C_d/C_n	1.58	1.62	1.73	1.55	2.15	2.1	/
C_{max}/C_n	2.14	2.12	2.17	2.10	2.03	2.3	/

Le Tableau III.2 synthétise les performances principales du moteur asynchrone obtenues pour chacune des types ou configurations de bobinage proposés.

A partir des courbes précédentes et du tableau de synthèse III.2 on constate ce qui suit :

- Le bobinage concentrique à six sections permet d'avoir un courant faible en régime nominal et au démarrage et un facteur de puissance meilleur. Mais le couple nominal, le couple de démarrage et le couple maximal sont réduits par rapport aux couples du bobinage concentrique imbriqué 3 par 2. Cette réduction est accompagnée par un diminution du rendement du moteur.
- Le bobinage concentrique imbriqué 2 par 3 présente un couple nominal et un courant nominal proche de ce celui du bobinage concentrique, tandis que les rapports I_d/I_n , et C_{max}/C_n sont élevés. Ce bobinage permet d'avoir un facteur de puissance élevé (supérieur à 0.89) par rapport à tous les autres types. Son rendement est relativement abaissé.
- Le bobinage imbriqué diamétral présent un couple nominal faible et un courant nominal faible par rapport aux autres bobinages. Les valeurs des rapports I_d/I_n , C_d/C_n et C_{max}/C_n sont proches des valeurs des rapports du bobinage concentrique imbriqué 3 par 2. Le rendement et le facteur de puissance sont pratiquement identique à ceux obtenus par le bobinage concentrique Imbriqué 3 par 2.
- Le bobinage imbriqué raccourci 16/18 présente des valeurs importantes du couple nominal et du courant en régime nominal. Les rapports I_d/I_n , C_{max}/C_n sont faible par rapport aux autres types de bobinages. Par contre, il présente un rapport C_d/C_n très élevé. En parallèle de ça il a un bon rendement et un facteur puissance faible.

- Le bobinage concentrique simple-double couche présente une légère diminution des valeurs du couple et courant nominaux par rapport au bobinage concentrique imbriqué 3 par 2. Cette diminution est accompagnée par une augmentation des rapports I_d/I_n , C_d/C_n et C_{max}/C_n . Ce bobinage présente les meilleurs rendement et facteur de puissance.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, l'analyse de l'influence de l'épaisseur d'entrefer et les différentes configurations de bobinages sur les performances du moteur 280-2 est effectuée. Après simulation de ce dernier avec cinq valeur d'entrefer, on remarque que l'entrefer d'épaisseur de 0.5mm permet d'avoir les meilleurs rendement et facteur de puissance. D'autre part, à partir de la comparaison des résultats de simulation pour les six configurations de bobinages, il apparait que le type de bobinage a une influence considérable sur les performances du moteur. Le bobinage concentrique simple-double présente les meilleures performances par rapport aux autres types de bobinage.

étapes utilisables pour implémenter celui-là dans l'environnement Flux2d, Enfin l'analyse des résultats de simulation dans le domaine fréquentiel avec la tension 380v est présentée.

Le chapitre suivant consacré de présenter et comparer les résultats de simulation du moteur à étudié avec différente type de bobinage.

Conclusion générale

Le travail réalisé dans ce mémoire concerne l'étude par la simulation des performances d'un moteur asynchrone bipolaire double cage de 75Kw en fonction de l'épaisseur d'entrefer et la configuration du bobinage statorique. En utilisant le logiciel Flux2d basé sur la méthode des éléments finis.

Ce mémoire est composé de trois grandes parties. Dans la première partie est rappelé brièvement le fonctionnement du moteur asynchrone et sa constitution. Et les différentes configurations de bobinage possibles pour ce type de moteur ont été détaillées. La deuxième partie est consacrée à la simulation du moteur étudié dans l'environnement Flux2d. Une bref présentation de ce logiciel et leurs étapes essentielles de simulation ont été présentées. La dernière partie est abordée par une étude comparative des performances du moteur 280-2 en fonction de l'épaisseur de l'entrefer, puis on simule les six configurations des bobinages appelées : le bobinage concentrique, le bobinage concentrique imbriqué 2 par 3, le bobinage imbriqué sans raccourcissement (diamétral), le bobinage imbriqué avec raccourcissement, le bobinage concentrique imbriqué 3 par 2 et le bobinage concentrique simple/double. Enfin les résultats obtenus pour ces bobinages sont analysés.

Comme nous avons mentionné précédemment et d'après la comparaison des résultats de simulation de la machine avec les différentes épaisseurs d'entrefer, il paraît clairement que l'augmentation de ces derniers ont une influence inversement proportionnelle sur les performances globales du moteur, particulièrement sur le facteur de puissance. On peut conclure que le choix d'une faible épaisseur d'entrefer permet d'améliorer l'efficacité énergétique du moteur.

L'analyse des différentes configurations de bobinage permet de confirmer que le choix du bobinage convenable du moteur pourra rendre ce dernier plus efficace.

Pour le moteur étudié dans ce projet et parmi les cinq configurations de bobinage proposées on peut conclure que le bobinage concentrique fractionnaire (simple-double couche) permet d'avoir les meilleures performances par rapport aux autres configurations étudiées dans ce mémoire.

Comme perspective, nous proposons à l'Electro-industries Azazga, de réaliser le moteur 280-2 avec le bobinage fractionnaire ou simple-double couche et de vérifier les performances obtenues expérimentalement.

Références bibliographiques

- [1] A. BEN SLIMANE, N. MEHALLA, « Contribution à l'étude de l'influence de type de bobinage sur le comportement électromagnétique d'une machine synchrone à pôles lisses 150VA », Mémoire de master. Université Mouloud Mammeri deTizi-ouzou,2015.
- [2] A. VERA, « CONTRIBUTION A L'ANALYSE ET L'AMELIORATION DE LA FIABILITE DES MACHINES ELECTRIQUES », Thèse de doctorat, Université Batna,2012.
- [3] Cédrat, « Flux2d application », vol 4 Mars 2005.
- [4] Cédrat, « Flux2d application physique », vol 5 Mars 2005.
- [5] DJ. SALAH, F. AHCENE, « Calcul D'un Moteur Asynchrone A Double Cages », Mémoire du magister, Université Mouloud MAMMERI TIZI-OUZOU, 2011/2012.
- [6] F. CHERIER, G. AMADE, « Modélisation En Vue Du Diagnostic Des Défauts Dans Une Machine Asynchrone », Mémoire d'Ingénieur d'Etat, Université Mohamed BOUGARA-Boumerdes, 2009.
- [7] G. DESBIENS, « MACHINES À INDUCTION BOBINÉES SUR DENTS », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, Français, 2003. <tel-00381904>.
- [8] H. BABU, « Finite-Element Analysis Of An Induction Motor With Inter-Turn Short-Circuit Faults », Mémoire de master, école de génie électrique et d'informatique Sweden, 2020.
- [9] H. TOUATI, S. BENSAID, « Calcul d'une série de machines asynchrones triphasées à cage d'écureuil assiste par ordinateur », Mémoire d'ingénieur, Institut National des Hydrocarbures et de la Chimie Boumerdes, 1996.
- [10] Jacques SAINT-MICHEL, Directeur Scientifique Moteurs Leroy Somer « Bobinage Des
- [11] K. AMMAR, M. MELLAL, « Dimensionnement D'un Moteur Asynchrone Triphasé A Cage D'écureuil », Mémoire du magister, Université Mouloud MAMMERI TIZI-OUZOU, 2012/2013.
- [12] L. BELAIDI, A. BOUCHERAK, « Identification Des Paramètres D'un Moteur Asynchrone Triphasé A Cage Avec La Méthode Des Eléments Finis », Mémoire du magister, Université Mouloud MAMMERI TIZI-OUZOU, 2012/2013.
- [13] M. AMMAR, « Surveillance Et Diagnostic Des Défauts Des Machines Electriques : Applications Aux Moteurs Asynchrones », Thèse de doctorat, Université Skikda,2012.
- [14] M. TEZCAN, A. YETGIN, « Influences of Winding Topology and Turn Number On Induction Motor Performance And Space Harmonics », Dumlupinar University, Department of Electrical and Electronics Engineering, 43100, KUTAHYA, TURKEY. May 2016.

Bibliographie

- [15] O. ABU IBAID, « Diagnostic Par Estimation Paramétrique De La MAS A Cage D'écureuil », Mémoire de master, Université de Mohamed BOUDIAF M'SILA, 2015/2016.
- [16] P. TRICKEY, « Induction motor ring width », IEEE Trans. Amer. Inst. Elect. Eng., ol 55, pp. 144-150,1936.
- [17] P.L. Alger, « Induction Machines - Their Behaviour and Uses », Gordon and Breach, Science publisher inc., New York, 1970.
- [18] R. BOUSSEKSOU, « Modélisation Analytique Des Machines Asynchrone Application Au Diagnostic », Mémoire de magister, Université Mentouri Constantine,2007.
- [19] S. BAZINE, « Conception et implantation d'un Méta-modèle de machines asynchrones en défaut », Thèse de doctorat, université de Poitiers, 2009.
- [20] S. KHELIF, « Modélisation Des Machines Asynchrones En Vue Du Diagnostic Prise En Compte Adéquate Du Circuit Magnétique », Université Mohamed KHIDER Biskra,2012.
- [21] T. BOUMEGORA, « Recherche Des Signatures Electromagnétiques Des Défauts Dans Une Machine Asynchrone Et Synthèse D'observateurs En Vue Du Diagnostic », Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, 2001.
- [22] T. Miller, J.R. Hendershot, « Design of Brushless Permanent-Magnet Motors », 1994.
- [23] W. Theodor, S. Gilbert, « Electrotechnique » livre, 3ème édition, Institut de recherche d'Hydro Québec (Canada), 1999.
- [24] M. HADŽISELIMOVIĆ et al, «Winding type influence on efficiency of an induction motor», PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY87.3(2001):61-61
- [25] J. Fang et al, «The effect analysis of single-double layers concentrated winding on squirrel cage induction motor », International Conference on Advanced Electronic Science and Technology (AEST 2016) Atlantis Press,2016.

Présentation de l'entreprise Electro-Industries, Azazga

Historique de l'entreprise

L'entreprise est issue de la réorganisation du secteur industriel opéré en Algérie entre 1980 et 2000 qui a conduit en 1999 à la restructuration de l'ancienne ENEL (Entreprise Nationale des Industries Electrotechniques) en un certain nombre d'entreprises publiques économiques, société par action (EPE/SPA), parmi lesquelles figure Electro-Industries. L'usine a été réalisée dans le cadre d'un contrat produit en main avec des partenaires allemands, en l'occurrence, SIEMENS pour le produit et FRITZ WERNER pour l'engineering et la construction, l'infrastructure est réalisée par Les entreprises algériennes ECOTEC, COSIDER et BATIMA.

Présentation de l'entreprise

L'entreprise Electro- Industries est située sur la route nationale N°12 à 30 Km du chef-lieu de la Wilaya de Tizi Ouzou.

L'ELECTO-INDUSTRIES est composée de trois unités situées dans le même site :

- **Unité des transformateurs de distribution.**
- **Unité des moteurs électriques.**
- **Unité de prestation technique.**

Les produits fabriqués par L'ELECTO-INDUSTRIES sont conformes aux recommandations de la CEI et aux normes Allemandes DIN/VDE.

Les clients principaux de l'Electro-Industries sont SONELGAZ, l'ensemble des entreprises nationales et les particuliers.

La capacité de production des transformateurs couvre les besoins du marché à 70% environ. L'entreprise produit uniquement 30% environ de sa capacité réelle en moteurs.

L'entreprise emploie un effectif de 867 travailleurs dont 25% de cadre, 38% de maîtrise et 37% d'exécution.

En matières de qualité, Electro-Industries dispose de ses propres laboratoires d'essai et de mesure, de ses produits ainsi pour le contrôle des principaux matériaux utilisés dans sa fabrication. Les différentes valeurs d'essai et de mesures sont consignées sur des procès-verbaux et des cartes de contrôle. L'entreprise a procédé à la mise en place de son système de qualité en 2002 et a été certifiée par QMI CANADA le 24.07.2004, ISO 9001 VERSION 2000.

Présentation de l'unité moteur asynchrone :

L'unité des moteurs asynchrone s'occupe de la fabrication des moteurs asynchrones à différentes puissances et à différentes hauteurs d'axes.

Les différents ateliers de fabrication des moteurs asynchrones

Le processus de fabrication des moteurs asynchrones est passée dans cinq ateliers :

- **Ateliers de découpage.**
- **Ateliers de moulage sous pression**
- **Ateliers de bobinage.**
- **Ateliers d'usinage.**
- **Ateliers de montage**

1. Ateliers de découpage

Tous les travaux de transformation de tôles utilisées pour la fabrication des pièces sont effectués dans cet atelier :

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

Fabrication des paquets statoriques et rotoriques

Tout d'abord, cet atelier acquiert des rouleaux de tôles magnétiques importés par Electro-Industries, solen le mode d'isolation celles-ci distinguées à :

-Isolées au vernis pour les moteurs à hauteurs d'axe 183 mm à 404mm.

-Non isolées : leurs isolations se fait dans des fours par oxydation pour les moteurs à hauteur d'axe 70 mm à 163 mm

Découpage et encochage des feuilles magnétiques

Dans cet atelier, le procédé le plus souvent utilise est une découpage automatique successif à l'intermédiaire de presse rapide. Ce procédé permet de découper et d'encoche dans le même cycle les tôles statoriques et rotoriques de différents types de moteurs selon la commande lancée à la machine

Une fois découpées et encochées, les tôles statoriques et rotoriques sont évacuées vers l'extérieur de la machine par des convoyeurs empilés séparément, deux autres procédés sont utilisés pour la fabrication des tôles statoriques et rotoriques : découpage automatique et semi-automatique.

Fabrication des capots de ventilateurs

A partir des tôles sous formes de disques en acier, on fait l'emboutissage par l'emboutisseuse, et pour la partie plane elle sera percée sous forme de grille par un poinçon matrice pour permettre l'évacuation (l'échappement) de la chaleur lors du fonctionnement du moteur.

2. Moulage sous pression

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

- **Injection du rotor en aluminium pur à 99.5%.**
- **Réalisation des pièces en alliage d'aluminium (Silicium, Manganèse, Cuivre) comme carcasse, flasque (AS, BS), boîtes à bornes, couvercles de boîte à bornes.**

3. Bobinage

Cet atelier composé de trois secteurs. Comme suit :

Secteur préparation isolation : toutes les isolants nécessaires pour le bobinage des machines sont préparés dans ce secteur (Caniveaux d'encoches, Cale de fermeture, Gaines isolantes, Séparateur de phase, Lame intermédiaire et Câble de raccordement).

Secteur préparation bobines : le processus de la fabrication des bobinages sont fait à partir des machines rotatives ont gabarits variables réglées par bobineur selon le besoin.

Secteur bobinage :

Secteur plus grand que ceux notés précédemment où se déroule le processus de fabrication stator bobiné allant de l'insertion des caniveaux d'encoches jusqu'à l'imprégnation.

- **Insertion des caniveaux d'encoches**

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

- **Insertion des bobines dans le stator**

L'insertion se fait soit : Automatiquement pour les moteurs à hauteur d'axe 70 mm à 130 mm. Ou manuellement pour les moteurs à hauteur d'axe 132 mm à 400 mm.

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

Une fois les bobines introduites, on place les séparateurs de phases pour éviter les courts-circuits entre phases, après cela, on procède au formage de têtes de bobines manuellement avec un mandrin et un marteau en bois (maillet) pour respecter l'homogénéité et les dimensions des têtes de bobines coté AS (coté entraînement) et BS (coté ventilation).

- **Connexion**

-Connexion entre les bobines

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

Les points de connexion sont brasés et isolés avec des gaines isolantes déjà placées.

-Connexion des bobines et câbles de raccordement

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

L'entrée et la sortie de chaque phase, sont distinguées des autres avec des couleurs.

Phase U = orange ; V : noir ; W : rouge.

d. Frettage et pressage des têtes de bobines

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

- **Contrôle**

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

- Contrôle électrique.

- La mesure de la résistance ohmique entre phases.

- Vérification s'il n'y pas de court-circuit entre spires, court-circuit entre phase et de court-circuit à la masse à haute tension (2000 V).

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

- Le contrôle de frettage des têtes de bobines.

- La vérification des caniveaux d'encoches, coupure de phase et les réglettes de fermeture.

- **Imprégnation**

Cette opération consiste à mettre de la résine au bobinage du stator pour le rendre plus compact et solidaire, deux sont utilisées Imprégnation de goutte à goutte ou Imprégnation dans un bain de résine.

4. Usinage

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

Fabrication de l'arbre

Une fois l'acier est contrôlé positivement, on découpe les arbres à l'aide d'une scie mécanique ou avec une scie automatique.

L'arbre à état brut passe au centre d'usinage pour être centré, cette opération consiste à percer deux trous qui servent de référence pour pouvoir tourner notre rotor dans un axe bien précis.

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

Usinage du rotor

Les opérations effectuées sur le rotor sont :

a. Tournage du paquet : Cette opération se fait avec un tour parallèle pour avoir un entrefer homogène et réduit.

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

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

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

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

- Equilibrage négatif avec enlèvement de matière.

Chapitre I Présentation de l'entreprise

Usinage des différentes pièces :

- **Carcasse**

Alésage de la carcasse à l'aide des tours verticaux pour recevoir le paquet. Perçage et taraudage des trous de fixation sur lesquels sont fixés les flasques AS et BS et la boîte à borne, à l'aide des perceuses, taraudeuses à broches multiples.

- **Flasques (AS et BS)**

Tournage des bords de centrage et cage de roulements.

- **Boîte à bornes**

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

- Perçage et taraudage du trou de la mise à la terre.

5. Montage

On recense deux secteurs essentiels dans cet atelier.

Secteur près montage

Les opérations réalisées dans ce secteur sont :

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

Secteur montage final

Dans ce secteur sont effectuées les opérations suivantes :

- **Mise en place du couvercle du palier intérieur coté BS pour assurer une bonne étanchéité du moteur.**
- **Emmanchement des roulements déjà graissés coté AS et BS avec une presse verticale et emplacement de clavette coté AS.**
- **Visser le couvercle de palier sur le flasque cela permet de cerner le roulement entre ces deux pièces.**
- **Usinage des différentes pièces :(carcasse, flasque, boîte à borne...)**

Contrôle final

Une fois le produit est fini, ce dernier subit un certain nombre de contrôles électriques.

Dans le contrôle électrique, on lui applique trois essais principaux :

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

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

- **Voilure flasque-bride**
- **Concentricité flasque-bride**
- **Concentricité bout d'arbre**
- **Bout d'arbre incliné**
- **Longueur bout d'arbre**
- **Ecart trous de patte-arbre**
- **Hauteur d'axe**
- **Jeu axial du rotor**
- **Bout d'arbre endommagé**
- **Bord de centrage endommagé**
- **Accessoires manquants**
- **Plaque signalétique endommagée**
- **Rainure de clavette endommagée.**

Normes

CEI 34-1 : Machines électriques tournantes- caractéristiques assignées et de fonctionnements.

CEI 34-2 : Méthode pour la détermination des pertes et du rendement.

CEI 34-5 : Classification des degrés de protection (code IC).

CEI 34-6 : Mode de refroidissement (code IC).

CEI 34-7 : Classification des formes de construction des dispositions de montage (code IM).

CEI 34-8 : Marque d'extrémité et sens de rotation.

CEI 34-9 : Limite des bruits.

CEI 34-11 : Protection thermique incorporée.

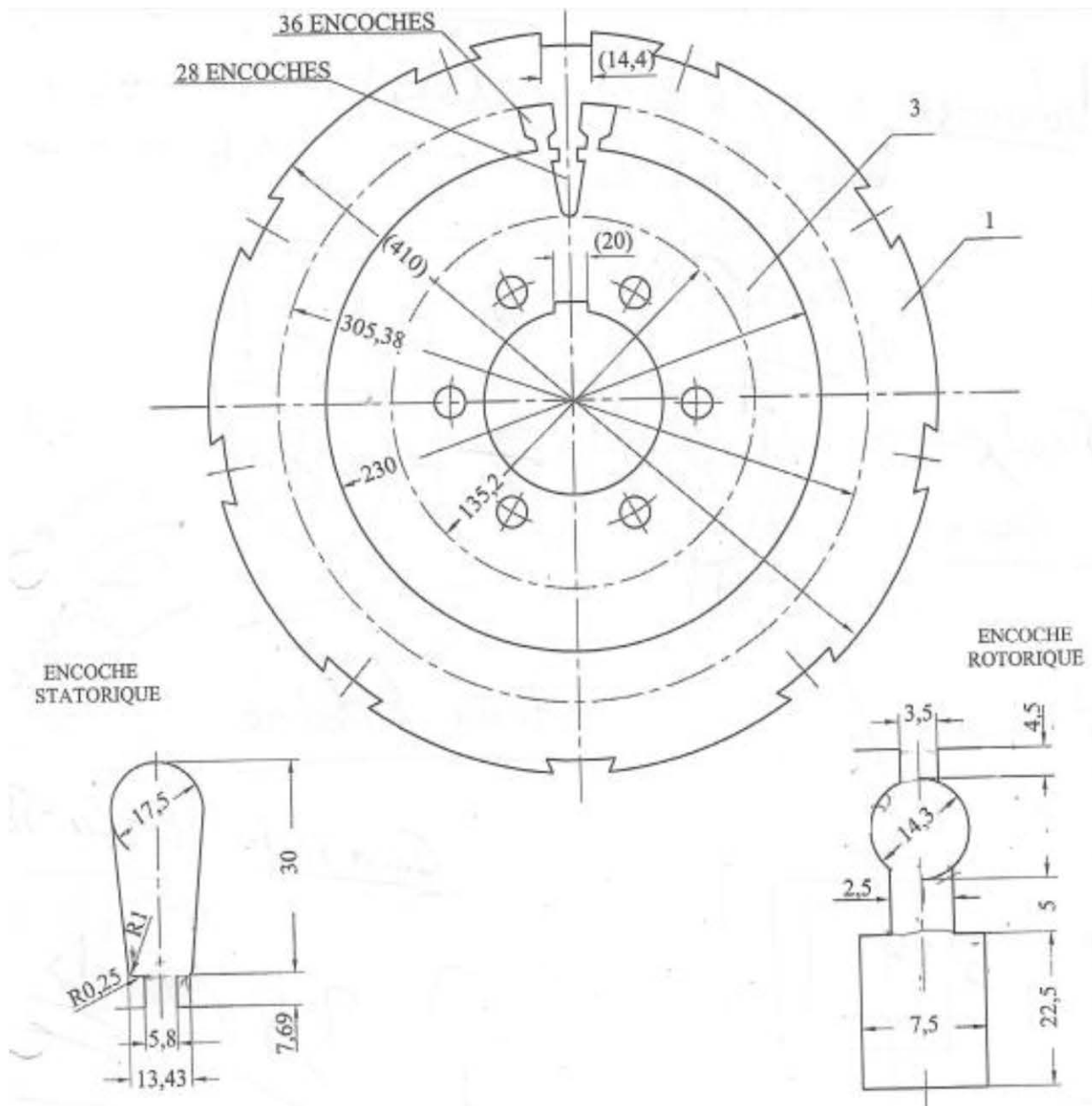
CEI 34-12 : caractéristique de démarrage des moteurs asynchrones à cage, à une seule vitesse, pour des tensions d'alimentations inférieures ou égales à 660V-50Hz.


CEI 34-14 : Vibrations mécaniques des machines à partir de la hauteur d'axe 56 mm

CEI 72 : Dimension et séries de puissance des machines électriques tournantes.

VDE0530 : Règlements relatifs aux machines électriques tournantes. Eux pièces.

La géométrie du moteur étudié (280-2)

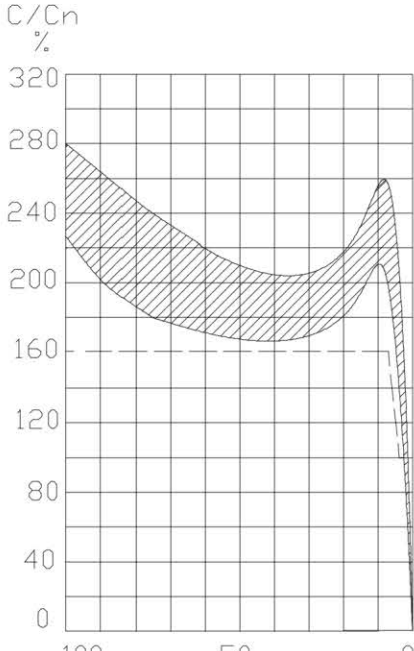


 <p>ELECTRO-INDUSTRIES UNITE MOTEURS ELECTRIQUES BP 17 AZAZGA TIZI-OUZOU ALGERIE</p>	DOCUMENT SYSTEME QUALITÉ	Édition Mars 2016
	FICHE TECHNIQUE PRODUIT	Référence : FTP 022
	<p><i>Moteur asynchrone triphasé 75 KW - 3000 Tr/min</i></p> <p>N° d'identification 890-100-2802-0241 B3 890-100-2802-1241 B5</p>	<p>TEL/FAX +213(0)26 34 51 29</p> <p>Page 1 2</p>



Moteur asynchrone triphasé fermé, conforme aux normes CEI 60034, CEI 60038 et CEI 60072. A carcasse ventilée en fonte et à rotor en court-circuit à cage d'écureuil.



CARACTERISTIQUES DE FONCTIONNEMENT				CARACTERISTIQUES DE COUPLE	
Type	.	280-2	-	 <p style="text-align: right;">Glissement Vitesse de synchronisme</p>	
Puissance nominale	P_N	75 (100)	KW CV		
Vitesse de rotation	N_N	2970	Tr/min		
Nombre de pôles	2 p	2	-		
Tensions d'alimentation	U_N	380	V		
Couplages électriques	-	.	-		
Mode de démarrage	Direct ou Y' (660/380V)				
Fréquence	f	50	Hz		
Courant absorbé	I_N	140	A		
Rendement	K	91,5	%		
Facteur de puissance	$\cos M$	0,89	-		
Couple nominal	C_N	245	Nm		
Courant au démarrage/ Courant nominal	I_d/I_n	6,3	-		
Couple au démarrage/ Couple nominal	C_d/C_n	1,6	-		

Annexe C

Couple maximal / Couple nominal	C _{max} /C _n	2,2	-
Classe de couple	Cl	10	-
Température ambiante	T _{amb.}	40	°C
Altitude	-	1000	M
Classe d'isolation	F (155°C)		H (180 ° C) sur commande
Services	S1 (continu)		S2 et S3 sur commande
<i>CARACTERISTIQUES MECANIKES (CONSTRUCTION)</i>			
Formes de construction	B3, B5, (B35 sur commande)		
Degrés de protection	IP 55		
Refroidissement et Ventilation	Ventilateur extérieur centrifuge, pour les deux sens de rotation .		
Equilibrage mécanique	Rotor équilibré dynamiquement avec clavettes.		
Paliers côtés D et N D: Côté bout d'arbre et N: Côté ventilation	Roulements à rouleaux cylindriques NU 214 C3 (côté D)0 Roulement à billes 6214 C4 (côté N) Paliers équipés de graisseurs .		
Bobinage	Protection thermique incorporée (capteurs à thermistance de type CTP à T _{inf} =150°C)		
Boite à bornes	Degré de protection IP 55.		
	Position à droite (vue du côté D), orientable 04 directions (90 °). (La position à gauche sur commande)		
	02 plaques à trois bornes (en laiton), filetage M10.		
	Deux entrées de câbles Pg42.		
	Borne de masse à l'intérieur de la boîte.		
Moment d'inertie J	0,70 Kg.m ²		
Poids net ~	580 Kg		
Peinture de finition	Gris pierre , RAL 7030.		
<i>Elaboré par : S.SMADHI</i>	<i>Visa :</i>	<i>Vérifié par :B. IGUER</i>	<i>Visa :</i>



ELECTRO-INDUSTRIES
UNITE MOTEURS
ELECTRIQUES BP 17
AZAZGA TIZI-OUZOU
ALGERIE

DOCUMENT SYSTEME QUALITE

ENCOMBREMENTS

Type: 280-2 75 KW - 3000 Tr/min
(Dimensions en mm)

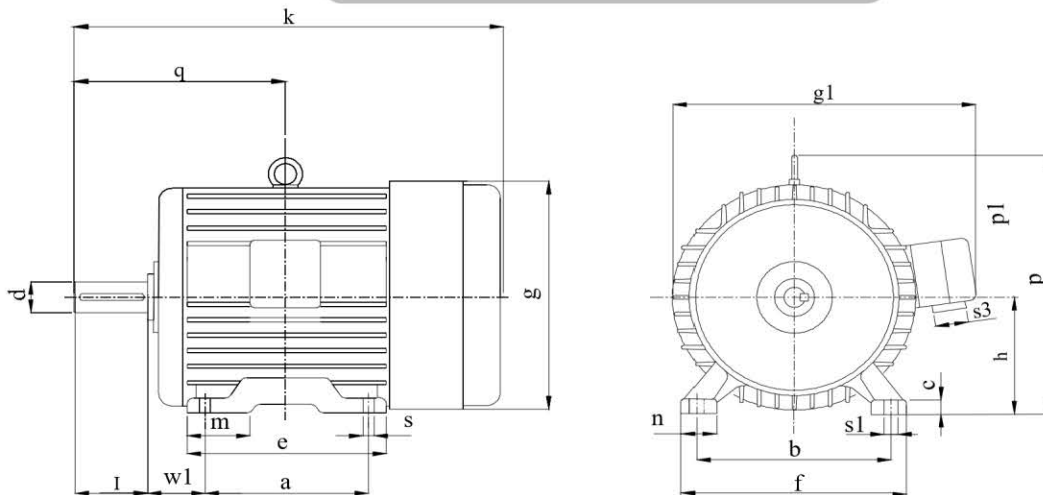
Édition Mars 2016

Référence : FTP 022

Page

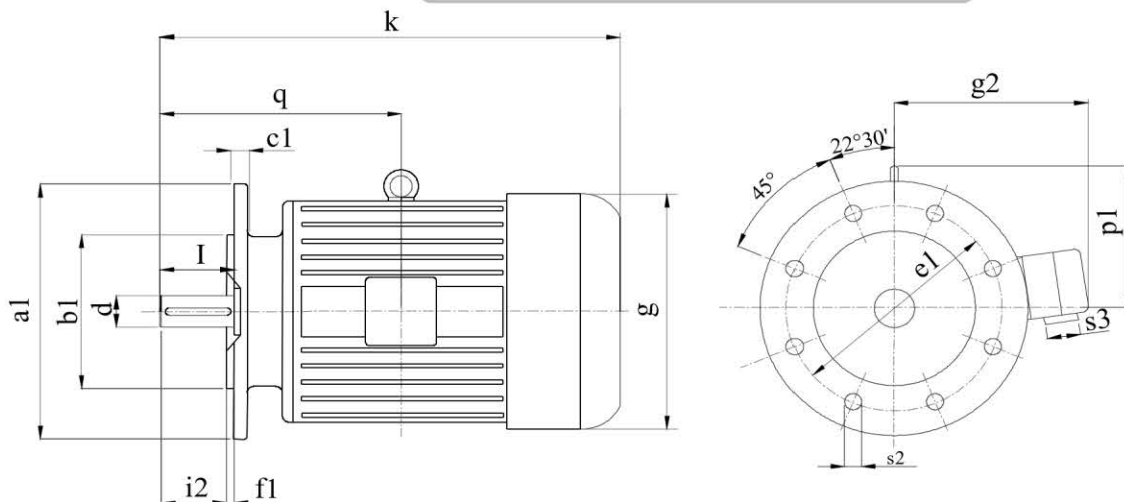
2/2

FORME DE CONSTRUCTION B3



a	b	c	e	f	g	g1	h	k	m	n	p	q	S	s1	s3	w1
368	457	42	468	557	550	785	280	995	120	100	635	514	25	25	Pg42	190

FORME DE CONSTRUCTION B5

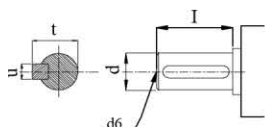


a1	b1	c1	e1	f1	i2	s2	s3	g	g2	k	p1	q
550	450	18	500	5	140	18	Pg42	550	510	995	355	514

BOUTS D'ARBRE

TOLERANCES DIMENSIONNELLES

d	I	t	u	d6
65 _{k6}	140 ± 0,30	69 ± 0,75	18 _{h9}	M20

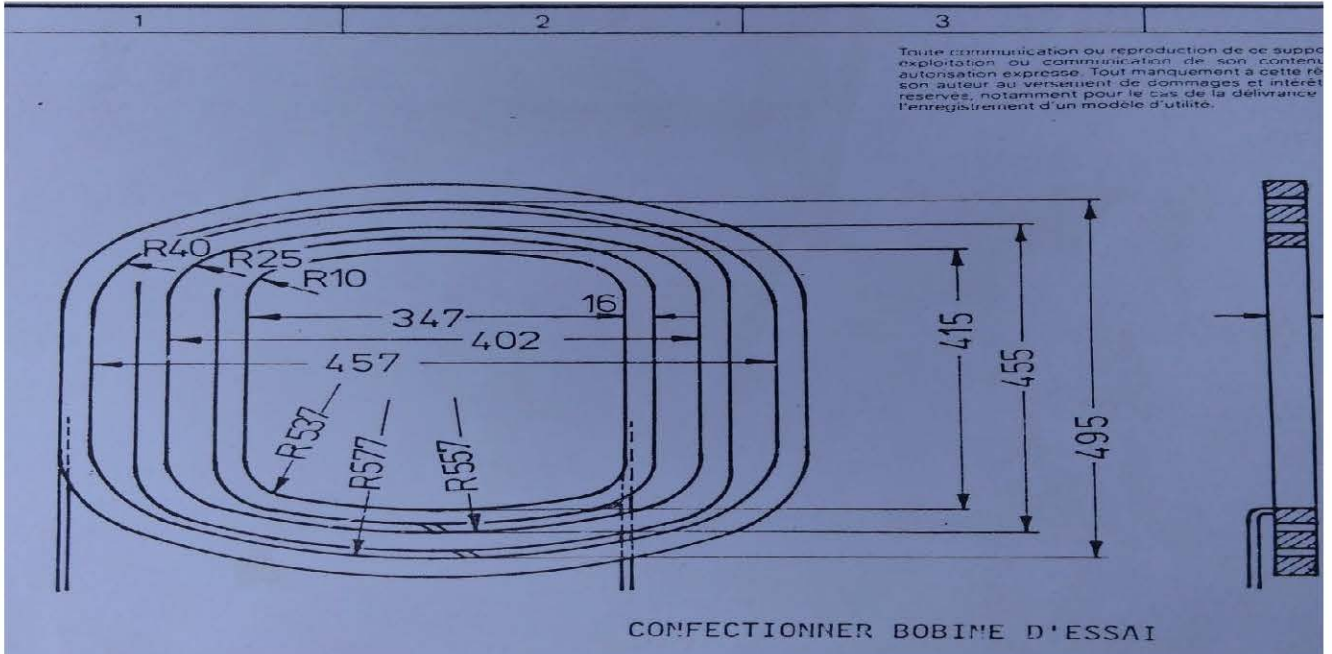


COTES		TOLERANCES	
b1		j6	
a		± 1,00 mm	
b		± 1,00 mm	
e et e1		± 0,50 mm	
h		± 0,50 mm	

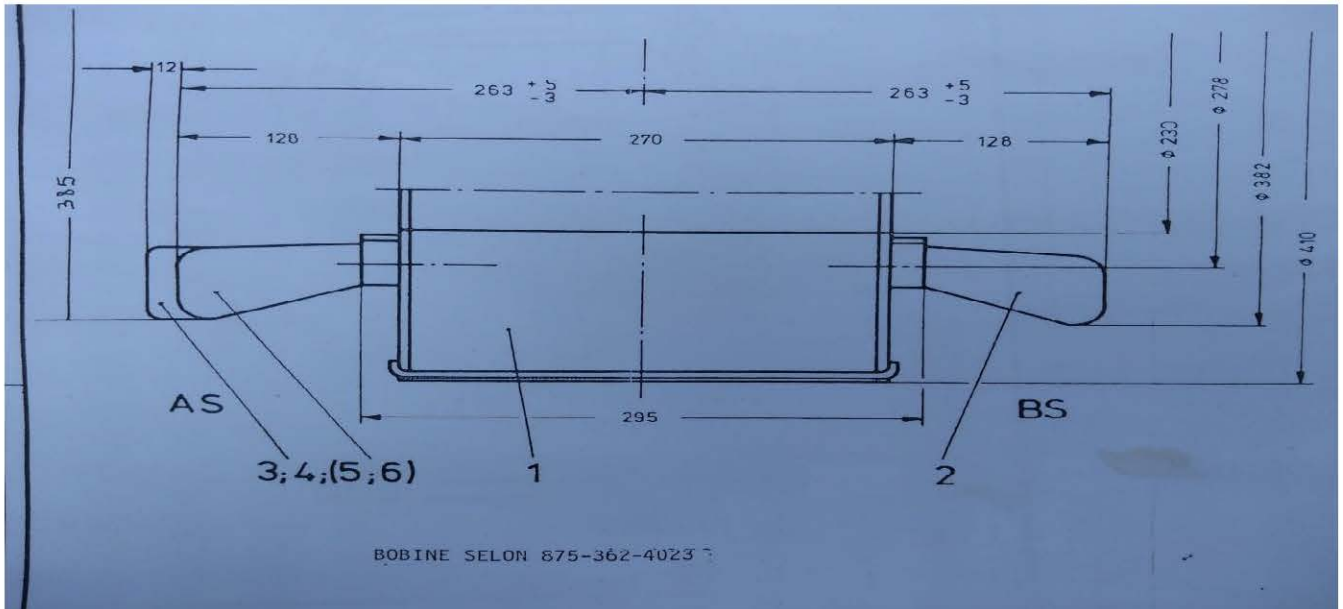
Calcul les effets d'extrémités :

1.L'inductance des têtes bobines :

La figure suivante montre la forme et les dimensions des une demi bobine entier et les dimensions des têtes bobines



(a)



(B)

Représentation les dimensions (a): des bobines et (b) : des têtes bobines

Pour calculer analytiquement cette inductance avec un peu paramètres données, on écrit un programme dans Matlab basé sur la formule de T. Miller.

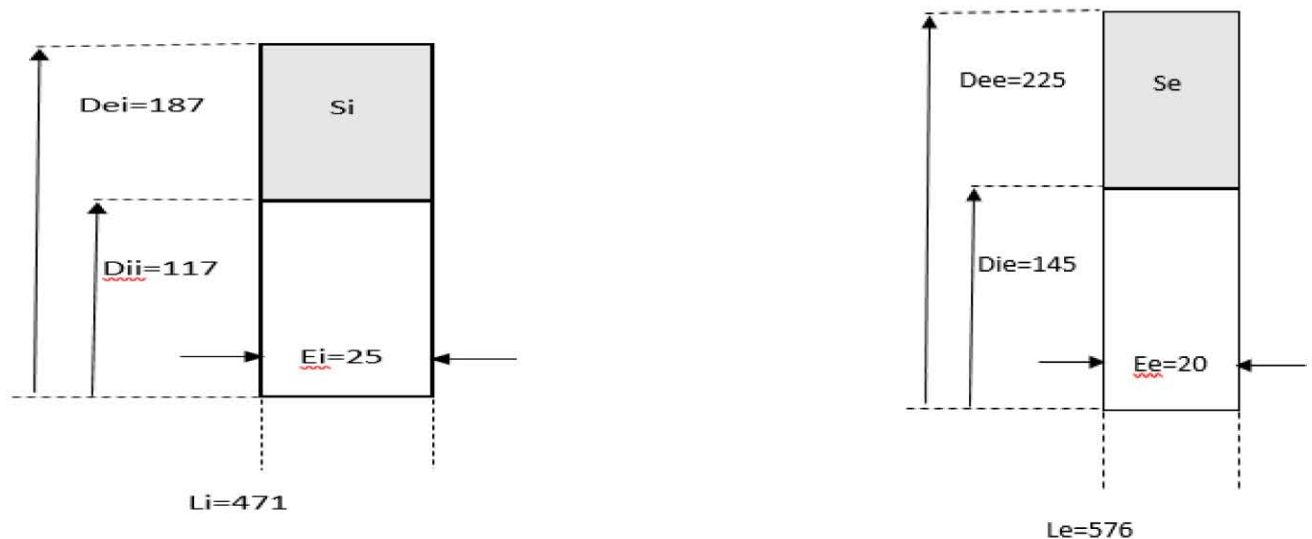
```
clear all
```

Annexe C

```
close all
clc
%%%calcul l'inductance des tetes bobines
Mu=pi*4e-7; %peréabilité à vide
Ns=51; %nombre de spires en serie par bobine
n=2; %nombre de bobine par phase
a=2; %nombre des voies parallèls
Dmoy=402e-3 %diamètre moyen des spires
A=(426e-6)/2 %la surface de demi couche en m2
GMD=0.447*sqrt(A)%la distance entre deux conducteurs dans l'encouche
Ltb=(n*Mu*Ns^2*Dmoy/(2*a^2))*log(4*Dmoy/GMD-2), ('inductance des tetes bobines en h')
```

2. Les résistances et les inductances des anneaux :

Nous proposons les formules de Trickey et d'Alger qui sont basées sur les géométries et les résistivités des matériaux utilisées, à dépende de ces formules, on écrit des programmes dans Matlab pour calculer l'inductances et les résistances des anneaux.



Géométries des anneaux : interne (à gauche) et externe (à droit)

2.a : Anneau interne

```
clear all
close all
clc
%%%calcul la résistance d'anneau intrne
Nr=28;%nombre des barres rotorique
rou_cu=17.2e-9;%la résistivité du cuivre
Li=471e-3;%la longueur d'anneau interne
Dii=117e-3;%diamètre interne d'anneau interne
Dei=187e-3;%diamètre extarne d'anneau interne
Ei=25e-3;%l'épaisseur d'anneau interne
Si=Ei*(Dei-Dii)/2 %la section d'anneau interne
```

Annexe C

```
%la résistance du cuivre
('la résistance totale intre-barre en ohm'),Ri=rou_cu*Li/(Si*Nr)
%%%calcul l'inductance d'anneau
Mu=4*3.14e-7;%la perméabilité à vide
P=2;%nombre de pair de pôles
%la perméance de fuite
Pfan1=0.365*Mu*Li/(2*Nr)*log10((1.5*Li/2)/(Et+(Dii+Dei)/2))
%l'inductance inter-barre
('Inductance inter-bars en henry'),Lfan1=Pfan1/(2*sin^2(P*pi/Nr))
```

2.b : Anneau externe

```
clear all
close all
clc
%%%calcul la résistance d'anneau externe
Nr=28;%nombre des barres rotorique
rou_cu=17.2e-9;%la résistivité du cuivre
Le=576e-3;%la longueur d'anneau externe
Die=145e-3;%diamètre interne d'anneau externe
Dee=225e-3;%diamètre externe d'anneau externe
Ee=20e-3;%l'épaisseur d'anneau externe
Se=Ee*(Die-Dii)/2 %la section d'anneau externe
%la résistance totale inter-barre
('la résistance totale inter-barre en ohm'),Ricu=rou_cu*Le/(Se*Nr)
%%%calcul l'inductance d'anneau
Mu=pi*4e-7;%la perméabilité à vide
P=1;%nombre de pair de pôles
%la perméance de fuite
Pfan2=0.365*Mu*Le/(2*Nr)*log10((1.5*Le)/(Ee+(Die+Dee)/2))
%l'inductance intre-barre
('Inductance intre-barre en henry'),Lan2=Pfan2/(2*sin^2(P*pi/Nr))
```


Résumé

L'objectif principal de ce mémoire consiste à étudier l'influence de l'entrefer et les différents bobinages sur les performances d'une machine asynchrone à cage. Ce mémoire s'est articulé autour de trois parties : Il commence par une présentation des généralités sur la machine asynchrone et en particulier leurs enroulement (bobinages). Ensuite un modèle de la machine est validé dans le logiciel Flux2d par une comparaison aux performances donnés par le constructeur de la machine. Ce mémoire se termine par une étude comparative le la machine sur la variation de l'épaisseur d'entrefer ainsi qu'une étude détaillée sur les types de bobinage : bobinage concentrique, bobinage concentrique imbriqué 2 par 3, bobinage imbriqué diamétral et raccourci et bobinage concentrique fractionnaire.

Mots clés : moteur asynchrone à cage, l'enroulement (bobinage), l'épaisseur d'entrefer, Flux2d, les performances des machines.

Abstract

The main objective of this paper is to study the influence of the air gap and the different windings on the performance of an asynchronous cage machine. This brief was structured around three parts:

It begins with a presentation of generalities on the asynchronous machine and in particular their windings. Then a model of the machine is validated in Flux2d finite element software. In order to compare the calculated and experimental performance. This memory is completed by a comparative study of the machine with respect to the variation in the thickness of the air gap and the five configurations of the windings called concentric winding, nested concentric winding 2 by 3, diametral and shortened nested winding and fractional concentric winding.

Keywords: cage asynchronous motor, winding (winding), air gap thickness, Flux2d, machine performance.

ملخص:

الهدف الرئيسي من هذه الأطروحة هو دراسة تأثير فجوة الهواء والملفات المختلفة على أداء آلة القفص غير المتزامن. تتكون هذه الرسالة من ثلاثة أجزاء:

يبدأ بعرض العموميات على الآلة غير المتزامنة وعلى وجه الخصوص الملفات (اللفات). ثم يتم التحقق من صحة نموذج الجهاز في برنامج العناصر المحدودة Flux2d من أجل مقارنة الأداء المحسوب والتجريبي. تنتهي هذه الأطروحة بدراسة مقارنة للآلة فيما يتعلق باختلاف سماكة فجوة الهواء والتكوينات الخمسة للملفات التي تسمى اللف المتحد المركز ، والملف المتداخل متحدة المركز 2×3 ، والملف المتداخل القطر والمختصر والملف الجزئي متحدة المركز.

الكلمات المفتاحية: محرك قفص غير متزامن ، لف (لف) ، سماكة فجوة الهواء ، Flux2d ، أداء الآلة.