

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية

Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا

Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك

Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Filière Électrotechnique

Spécialité Machines Electriques

EL BRAZZI NACER EDDINE

&

ERROUKRMA OMAR

---

# Modélisation et diagnostic d'une MADA

---

Proposé par : Mr . HACHELAF REDOUANE

Année Universitaire 2018-2019

## **REMERCIEMENTS**

Tout d'abord je tiens à remercier Dieu le tout puissant, de m'avoir permis d'arriver à ce niveau d'études, et aussi pour m'avoir donné beaucoup de patience et de courage.

J'adresse mes vifs remerciements à mon Encadreur Mr . HACHELAF pour m'avoir constamment guidé tout long de mon projet et pour les précieux conseil qu'il m'ont donné, et pour leur serviabilité, leur disponibilité et leur conseil constructif.

Nos remerciements vont également le Co-promoteur Dr D.KOUCHIH pour son attention et son suivi.

Je tiens à remercier, les examinateurs pour l'honneur qu'ils m'ont fait enacceptant de juger ce travail. J'adresse aussi mes sincères reconnaissances à tous les enseignants de Département de Génie Electrique pour leurs aides, soutiens et leurs conseils, sans oublier tout le personnel administratif du département.

Un remerciement spécial aux étudiants de la 2emeannée Master de la spécialité de génie électrique spécifiquement machines électriques.

En fin ont n'oublié pas tout personne ayant participé de près ou de loin à réaliser ce travail, et tout personnes dont nous avons oublié de cité

# Dédicace

*Je dédie ce mémoire à nos très chers  
parents Pour leur soutien moral et  
matériel, pour leurs*

*Encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés dans  
les*

*moments les plus*

*Ardus.*

*A mes frères*

*A toute la famille*

*ERROUKRMA . A mes tantes*

*et mes oncles.*

*Et à tous mes amis.*

*A toutes les personnes qui ont participé de près ou de  
loin à la réalisation de ce travail.*

*E.OMAR*

# Dédicace

*Je dédie ce mémoire à nos très chers  
parents Pour leur soutien moral et  
matériel, pour leurs*

*Encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés dans  
les*

*moments les plus*

*Ardus.*

*A mes frères*

*A toute la famille*

*ELBRAZZI . A mes tantes*

*et mes oncles.*

*Et à tous mes amis.*

*A toutes les personnes qui ont participé de près ou de  
loin à la réalisation de ce travail.*

***B.NACER EDDINE***

# Table des matières

Introduction générale .....	1
1 CHAPITRE 01 : .....	3
1.1 Introduction .....	3
1.2 Machine asynchrone à double alimentation .....	3
1.2.1 Description de la machine asynchrone à double alimentation : .....	3
1.2.2 Structure de la MADA [2] .....	3
1.2.3 MADA à rotor bobiné : .....	4
1.2.4 MADA sans balais : .....	4
1.2.5 MADA en cascade : .....	4
1.3 Classification des machines a doublé alimentation (MADA) .....	5
1.4 Le principe de fonctionnement de la MADA .....	5
1.4.1 Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA : .....	7
1.4.2 Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone .....	7
1.4.3 Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone : .....	7
1.4.4 Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone : .....	8
1.4.5 Fonctionnement en mode génératrice hyper-synchrone : .....	8
1.5 Aperçus sur les configurations de la MADA à rotor bobiné : .....	9
1.5.1 Configuration pour application moteur : .....	9
1.5.2 Stator alimenté par le réseau, rotor alimenté par un onduleur : .....	9
1.5.3 Stator relié au réseau, rotor alimenté par un Cycloconvertisseur : .....	10
1.5.4 MADA alimenté par deux convertisseurs indépendants : .....	10
1.5.5 Configuration pour application génératrice : .....	11
1.5.6 MADA à énergie rotorique dissipée : .....	11
1.6 Domaines d'application de la MADA : .....	14
1.7 Avantages et inconvénients de la MADA : .....	14
1.7.1 Avantages de la MADA : .....	14
1.7.2 Inconvénients de la MADA : .....	15
1.8 Les différents travaux réalisés sur la MADA : .....	15
1.9 État de l'art du diagnostic de la machine asynchrone : .....	18
1.9.1 Cause des défauts : .....	18
1.9.2 Présentation des défauts : .....	19
1.9.3 Défaut de roulements : .....	20
1.9.4 Défauts d'excentricités : .....	20
1.10 Rotor bobiné : .....	21
1.10.1 Défaut de courts-circuits : .....	21
1.10.2 Défaut de contact balai – bague : .....	22

1.11	Méthodes de diagnostic utilisées pour détecter les défauts de la machine .....	22
1.11.1	Méthodes sans modèle : .....	22
1.12	Méthodes du diagnostic à base du modèle .....	25
1.13	Traitement de signaux .....	25
1.13.1	Analyse spectrale .....	26
1.13.2	Analyse cepstrale .....	26
1.14	Les méthodes de détection de fréquences connues .....	26
1.14.1	Méthodes temps–fréquence .....	26
1.14.2	Méthode temps–échelle : .....	26
1.15	Conclusion : .....	26
2	CHAPITRE 02 : .....	30
2.1	INTRODUCTION : .....	29
2.2	Méthodes de modélisation de la machine asynchrone double alimentation : .....	29
2.2.1	Méthode des réseaux de perméance .....	30
2.2.2	Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés .....	30
2.2.3	Méthode des éléments finis .....	31
2.2.4	Implémentation de la méthode des éléments finis .....	31
2.3	Modèle éléments finis de la machine asynchrone double alimentation a rotor bobiné .....	32
2.3.1	Formulations .....	32
2.3.2	Le modèle employé .....	33
2.3.3	Le mode magnétostatique .....	33
2.3.4	Le mode magnétodynamique .....	34
2.3.5	Le mode magnétique transitoire .....	34
2.3.6	Le principe de la MEF .....	35
2.3.7	Présentation du logiciel FLUX2D : .....	36
2.4	Construction du modèle de la machine asynchrone : .....	38
2.5	Conclusion : .....	39
3	CHAPITRE03 : .....	40
3.1	INTRODUCTION : .....	40
3.2	Les propriétés physiques et régions : .....	40
3.3	Aspect mécanique de la machine a induction .....	41
3.4	LA GEOMETRIE DE LA MACHINE ETUDIEE ET SES DIMENSIONS : .....	41
3.4.1	Laminage de stator .....	41
3.4.2	Laminage de rotor .....	43
3.4.3	Matériaux magnétiques .....	43
3.5	Procédure de construction du modèle par FLUX2D .....	45
3.5.1	Génération du maillage : .....	45

3.5.2	Conception d'enroulement .....	46
3.6	Circuit électrique .....	53
3.6.1	Détails du modèle .....	53
3.6.2	Circuit équivalent de la MADA .....	55
3.6.3	Perte de conducteur électrique .....	57
3.7	Simulation de la MADA à l'état sain : .....	58
3.7.1	Tension d'alimentations .....	58
1.1.1	Résultat de simulation Fonctionnement à vide : .....	59
3.7.2	Interprétations des résultats à vide : .....	61
3.7.3	Résultat de simulation Fonctionnement en charge : .....	61
3.7.4	Résultat expérimentale a l'état sain en charge .....	64
3.8	Simulation de la MADA à l'état déséquilibrations de tension $V_1= 110V$ : .....	64
3.8.1	Tension d'alimentations déséquilibre : .....	65
3.8.2	Résultat de simulation Fonctionnement à vide déséquilibrée .....	65
3.8.3	Interprétation des résultats : .....	67
3.8.4	Fonctionnement en charge de 10 Nm : .....	68
3.8.5	Interprétation Déséquilibre en charge .....	70
3.9	Tension de Neutre .....	70
3.9.1	Fonctionnement à vide .....	70
3.9.2	Fonctionnement en charge .....	71
3.9.3	Interprétation des résultats : .....	71
3.10	Résultat de l'analyse spectrale par FFT .....	72
3.10.1	Fonctionnement a vide .....	72
3.10.2	Fonctionnement en charge .....	73
3.10.3	Interprétation de l'analyse spectrale .....	73
3.11	CONCLUSION .....	74
4	CHAPITRE 4 : .....	75
4.6.1	Essais à vide en régime sain : .....	81
4.1	Synthèse des techniques du diagnostic utilisé : .....	85
4.2	CONCLUSION .....	86

## Liste des figures

Figure 1-1.Symbole d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) .....	3
FIGURE 1-2. structure de la Mada sans balais.....	4
FIGURE 1-3.structure en cascade de deux machines asynchrones.....	5
FIGURE 1-4. classification des machines électriques à double alimentation .....	5
FIGURE 1-5.fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone.....	7
FIGURE 1-6.fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone.....	8
FIGURE 1-7.fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone .....	8
FIGURE 1-8.fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone.....	9
FIGURE 1-9.schéma de la Mada dont le rotor est alimenté par un onduleur .....	10
FIGURE 1-10.schéma de la Mada dont le rotor alimenté par un cycloconvertisseur.....	10
FIGURE 1-11.schéma synoptique pour l'alimentation par deux cyclo convertisseurs .....	11
FIGURE 1-12.mada à énergie rotorique dissipée .....	11
FIGURE 1-13. effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique .....	12
FIGURE 1-14.mada à structure de kramer .....	12
FIGURE 1-15.structure de scherbius avec cycloconvertisseur .....	13
FIGURE 1-16. structure de scherbius avec convertisseurs mli.....	13
FIGURE 1-17.schéma général de principe de deux mada montées en cascade .....	15
FIGURE 1-18.mada fonctionnant en moteur à vitesse variable hautes performances .....	16
FIGURE 1-19.représentation des différents défauts statoriques possibles.....	19
FIGURE 1-20.représentation de l'excentricité statique et dynamique .....	21
FIGURE 1-21.mesures vibratoires sur la machine asynchrone .....	23
FIGURE 2-1. fonction d'interpolation d'un élément .....	35
FIGURE 2-2. l'enchaînement des programmes de flux 2d. ....	38
FIGURE 3-1.coupe d'un générateur à induction à rotor bobiné [36].....	41
FIGURE 3-2.Structure de la fente de stator.....	42
FIGURE 3-3.Structure de fente de rotor.....	43
FIGURE 3-4.caractéristique matériaux magnétiques .....	44
FIGURE 3-5. triphasés 4 pôles 60 slots à SIMPLE CONFIGURATION d'enroulement de la couche avec deux ensembles parallèles (pas de bobinage 14/01).....	50
FIGURE 3-6.triphasés 4 pôles 48 slots à simple configuration d'enroulement de la couche avec deux ensembles parallèles (pas d'enroulement de 1 à 12). ....	51
FIGURE 3-7.connexion enroulement à trois phases dans le stator configuration d'enroulement.....	52
FIGURE 3-8.connexion enroulement triphasé à rotor double configuration d'enroulement. ....	52
FIGURE 3-9.Circuit couplé avec le modèle FE .....	53
FIGURE 3-10.fem maillage de dfig.....	54
FIGURE 3-11.courbe de flux de contour de mada.....	55
FIGURE 3-12.circuit équivalent de la mada.....	56



FIGURE 3-13.tension d'entrée équilibre .....	58
FIGURE 3-14.la distribution des lignes du flux à vide en régime permanent .....	59
<b>FIGURE 3-15.</b> L'induction B à vide en régime permanent .....	59
FIGURE 3-16.vitesse de rotation de la machine a l'état sain à vide.....	60
FIGURE 3-17.forme d'onde du courant statorique a vidé à l'état sain .....	60
FIGURE 3-18.forme d'onde du courant rotorique e de la machine à vide.....	60
FIGURE 3-19.couple électromagnétique de la machine sain à vide. ....	61
FIGURE 3-20.la distribution des lignes du flux en charge de 10 nm régime permanent.....	62
FIGURE 3-21.l'induction b en charge de 10 nm régime permanent .....	62
FIGURE 3-22.vitesse de rotation de la machine a l'état sain en charge de 10 nm .....	63
FIGURE 3-23.forme d'onde du courant statorique a l'état sain en charge de 10 nm.....	63
FIGURE 3-24.forme d'onde du courant rotorique a vidé a l'état sain en charge de 10 nm ....	63
FIGURE 3-25.couple électromagnétique de la machine sain en charge de 10 nm.....	64
FIGURE 3-26.tension d'alimentation déséquilibre.....	65
FIGURE 3-27.la distribution des lignes du flux à vide a l'état déséquilibrée .....	65
FIGURE 3-28.L'induction B a vidé à l'état déséquilibrée.....	66
FIGURE 3-29.la vitesse de rotation de la machine à l'état déséquilibrée à vide .....	66
FIGURE 3-30.couple électromagnétique de la machine à l'état déséquilibrée à vide.....	66
FIGURE 3-31.forme d'onde du courant statorique de la machine à l'état déséquilibrée à vide .....	67
FIGURE 3-32. forme d'onde du courant rotorique e de la machine à l'état déséquilibrée à vide .....	67
FIGURE 3-33. la distribution des lignes du flux en charge à l'état déséquilibrée. ....	68
FIGURE 3-34.l'induction b en charge à l'état déséquilibrée .....	68
FIGURE 3-35.La Vitesse de rotation de la machine à l'état déséquilibrée en charge.....	69
FIGURE 3-36.couple électromagnétique de la machine à l'état déséquilibrée en charge .....	69
FIGURE 3-37.forme d'onde du courant statorique de la machine à l'état déséquilibrée en charge.....	69
FIGURE 3-38.forme d'onde du courant rotorique e de la machine à l'état déséquilibrée en charge .....	70
Figure 3-39:Tension de neutre a l'état sain à vide.....	70
Figure 3-40:Tension de neutre a l'état déséquilibré à vide .....	71
Figure 3-41:Tension de neutre a l'état sain en charge .....	71
Figure 3-42:Tension de neutre a l'état déséquilibré en charge.....	71
Figure 3-43:Le spectre de courant statorique a vidé avec tension équilibre .....	72
Figure 3-44:Le spectre de courant statorique a vidé avec tension déséquilibre.....	72
Figure 3-45:Le spectre de courant statorique en charge avec tension équilibre .....	73
Figure 3-46 : Le spectre de courant statorique en charge avec tension déséquilibre.....	73
Figure 4-1 presentation banc de mesure et traitement des signaux.....	79
Figure 4-2 presentation banc de mesure et traitement des signaux.....	79
Figure 4-3 representation temporelle des tensions statorique equilibre. ....	81
Figure 4-4 representation temporelle des courants statorique equilibre.....	82
Figure 4-5 representation l'équilibrage des courants statorique equilibre.....	82

Figure 4-6 representation l'équilibrage des courants statorique equilibre.....	82
Figure 4-7 representation des courants statorique disequibre avec courant neutre. ....	83
Figure 4-8 representation des courants statorique disequibre. ....	83
Figure 4-9 : les spectres du courant statorique a vide equilibre .....	84
Figure 4-10 les spectres du courant statorique a vide disequibre.....	84
Figure 4-11 : synthese du diagnostic etudie .....	85

### **Liste des tableaux**

Tableau 1-1 : les condition mathématique pour chaque mode de fonctionnement de la Mada..	9
Tableau 3-1 : Les paramètre de la machine .....	41
Tableau 3-2 : valeur de caractéristique matériaux magnétiques .....	44
Tableau 4-1 :: les modes de fonctionnement traités .....	81

## **Symbole : significations et Les abréviations**

$l$ : La longueur du conducteur

$V$ : La vitesse du conducteur

$B$ : Induction magnétique

$F_m$ : La force mécanique

$E_0$ : Générateur de f.é.m.

$R$ : Résistance interne

$I$ : Le courant

$F_e$ : Force électromagnétique

$E$ : Force électromotrices (f.é.m.)

$\Omega$ : Domaine surfacique.

$A$ : Potentiel magnétique.

$\Gamma$ : Frontière de domaine  $\Omega$ .

$\mu_0$  :Perméabilité magnétique de l'air.

$\mu_r$ : La perméabilité relative du fer

$\varepsilon$ : Permittivité électrique.

$\mu$ : Perméabilité magnétique.

$J$ : Densité de courant uniforme.

$\rho$ : Charges électriques.

$\sigma$ : conductivité électrique.

$j$ : unité imaginaire.

$t$ : Temps.

$L_1, L_2, L_3$ : Inductances de fuite des têtes des bobines statorique.

$R_1$  : La résistance d'un fil de l'enroulement de stator

$R'_1$ : *résistance de conductor bobine statorique*

$R_2$ : La résistance d'un fil de l'enroulement de rotor

$R'_2$ : *résistance de conductor bobine rotor*

$\omega_s$ : Pulsation statorique.

$P$ : Nombre de paires de pôles.

$N_{\omega_s}$  :Ordre des harmoniques de temps de la FMM.

$N_d$  : Ordre de l'excentricité.

$F_s$ : Fréquence d'alimentation.

$F_r$ : Fréquence rotorique.

$f_{he}$ : Fréquence des harmoniques d'encoches rotoriques.

$f_v$ : Fréquence caractéristique de vibration.

$F_b$ : Fréquence caractéristique du défaut de barres.

$N_b$ : Nombre d'éléments roulant du roulement.

$\Theta$ : L'angle de contact des bielles avec les bagues du roulement.

$f_m$  : Fréquence de rotation du rotor

$f_r$  : La fréquence rotorique

$f_s$  : La fréquence statorique

$g$ : Le glissement

$N_r$  : Vitesse de rotation

$P$ : Nombre de paires de pôles

$\omega_m$  : Vitesse angulaire de rotation du rotor

$\omega_r$  : Pulsation rotorique

$\omega_s$ : Pulsation statorique

$\Omega_m$  : Vitesse de rotation de la MADA

$P_s$  : Puissance statorique

$p_{mec}$  : Puissance mécanique

$P_r$  : Puissance rotorique

$C_e$  : Couple électromagnétique

$C_r$  : Couple résistant

$J$ : Moment d'inertie des parties tournantes

MADA : machines a doublé alimentation

FFT : Transformée de Fourier rapide

MCSA : Motor Current Signature Analysis.

MASDE : Machine Asynchrone à Double Etoile

*CDFM : Cascaded Douly-Fed Induction Machine)*

FEM : Finite Elément Méthode



## Introduction générale

Actuellement, l'utilisation des moteurs à courant alternatif est de plus en plus fréquente, car ces machines sont caractérisées par leur robustesse et par leur longévité, bien que celles-ci imposent des structures internes et des stratégies de commande plus complexes.

De nos jours, plusieurs travaux ont été orientés vers l'étude de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), qui est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures : le stator et le rotor.

Grâce au développement des équipements de l'électronique de puissance et l'apparition des techniques de commande modernes, la MADA présente une solution idéale pour les entraînements à hautes performances et à vitesse variable. L'intérêt de telles machines est qu'elles assurent un fonctionnement à très basse vitesse.

L'application potentielle de la MADA a été un sujet de recherche le long de la dernière décennie. En effet, l'association des machines asynchrones à double alimentation à des convertisseurs statiques permet de donner différentes stratégies de commande et présente un autre avantage d'utilisation de ces machines.

L'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la machine asynchrone à double alimentation comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes d'entraînement électrique. De plus, la présence d'un convertisseur entre le rotor et le réseau permet de contrôler le transfert de puissance entre le stator et le réseau.

La surveillance et le diagnostic des machines électriques représentent un enjeu scientifique et exemple, la sûreté de fonctionnement qui peut être définie par l'aptitude d'une entité à satisfaire une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données. Elle est scientifiquement caractérisée par l'étude statique et dynamique des systèmes du point de vue prévisionnel, opérationnel et expérimental, en tenant compte des aspects de probabilités et de conséquences liées aux défaillances. La surveillance est un moyen de garantir le bon fonctionnement des systèmes. Le diagnostic est une partie de la surveillance qui a pour objectif de trouver la cause des dysfonctionnements. Multiples défaillances peuvent apparaître dans la machine asynchrone. Elles peuvent être prévisibles ou intempestives, mécaniques, électriques ou magnétiques et leurs causes sont très variées

La modélisation et la simulation de la machine asynchrone double alimentation ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche, que ce soit dans le but de dimensionnement, de la commande ou du diagnostic. La diversité des objectifs a fait apparaître plusieurs techniques de modélisation et d'outils de simulation, dont chaque type de modélisation est plus ou moins adapté à un domaine plus que les autres.

L'objectif de notre travail est la modélisation de la machine asynchrone double alimentation, pour la simulation de défauts déséquilibre au niveau des tensions d'alimentation et faire une l'analyse spectrale du courant statorique. Pour cela, le mémoire a été organisé comme suit :

Le premier chapitre aborde l'étude sous une forme assez descriptive. En effet, à travers une étude bibliographique. Nous présentons des généralités sur la MADA, le principe de fonctionnement, les différents défauts leurs causes et leurs effets puis nous avons abordé les méthodes de diagnostic.

Dans ce deuxième chapitre, nous avons présenté un modèle numérique de la machine asynchrone double alimentation, basé sur la méthode des éléments finis, sous l'environnement de logiciel Flux 2D.

Nous présentons dans troisième chapitre les résultats de simulation d'une machine asynchrone (MADA) dans le cas où la machine à l'état sain puis le cas de la présence de défaut, principalement déséquilibre de tension et faire la diagnostique de la machine par la technique d'analyse spectrale des courants.

Dans Le quatrième chapitre nous avons abordé des essais expérimentaux sur moteur asynchrone double alimentation. Nous avons effectué des essais à vide et en charge pour les cas moteurs sain et en présence des défauts déséquilibre de la tension d'alimentation.

**CHAPITRE 01 :**  
**Généralités et Principe de Fonctionnement de la**  
**MADA.**



## 1.1 Introduction

La machine à double alimentation (MADA) ou doubly-fed induction machine (DFIM) est, Comme son nom l'indique, une machine triphasée à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessible, dans lesquels la puissance peut être fournie ou extraite de la machine à travers ces enroulements.

Ce type de machine nécessite une seule source d'alimentation alternative qui peut Alimenter les deux côtés de la machine et ceci constitue un avantage principal surtout dans Les domaines de l'entraînement et de la génération à vitesse variable et ou le glissement de la machine à double alimentation peut être modifié au moyen de l'association des convertisseurs de puissance du coté statorique ou rotorique ou bien les deux à la fois.

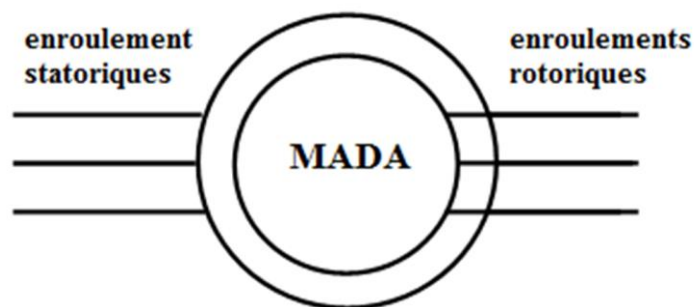


FIGURE 1-1.SYMBOLE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION (MADA)

## 1.2 Machine asynchrone à double alimentation

### 1.2.1 Description de la machine asynchrone à double alimentation :

La MADA à une double accessibilité au stator et au rotor. Dans son fonctionnement, elle S'apparente au fonctionnement de la machine synchrone avec une vitesse constante du fait de l'imposition des fréquences aux deux armatures et le caractère asynchrone est lié à la Différence de vitesse entre le champ statorique et le rotor. Sa magnétisation est donnée par la Contribution des deux armatures alimentées par des sources à courant alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de "machine synchrone excitation alternative [1].

### 1.2.2 Structure de la MADA [2]

Selon la conception du rotor, plusieurs types de machines asynchrones à double alimentation ont été envisagés. On va décrire les plus utilisés dans l'industrie.

### 1.2.3 MADA à rotor bobiné :

La machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné est composée, comme toute machine à courant alternatif, d'un stator et d'un rotor. Le stator est identique à celui d'une machine asynchrone classique. Le rotor est constitué d'enroulements triphasés connectés en étoiles dont les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants.

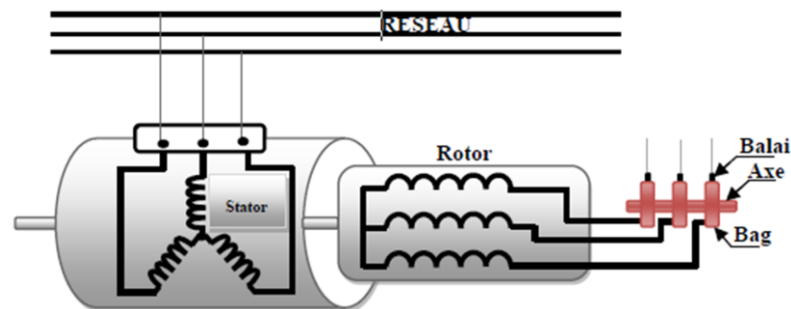


FIGURE1. 1.SCHEMA DU ROTOR DE LA MADA A ROTOR BOBINE

### 1.2.4 MADA sans balais :

Cette machine est très proche à la précédente, sauf que cette fois ci les deux enroulements statoriques appartiennent à un circuit magnétique commun. Le rotor est commun et à cage d'écureuil.

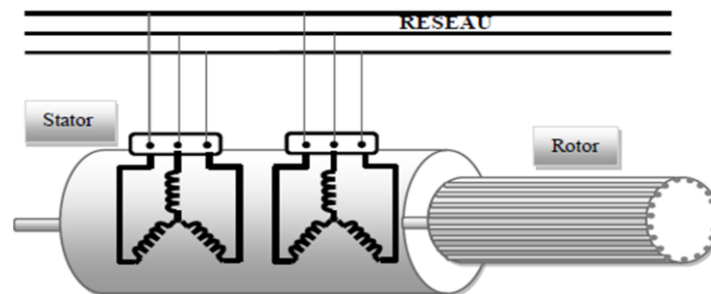


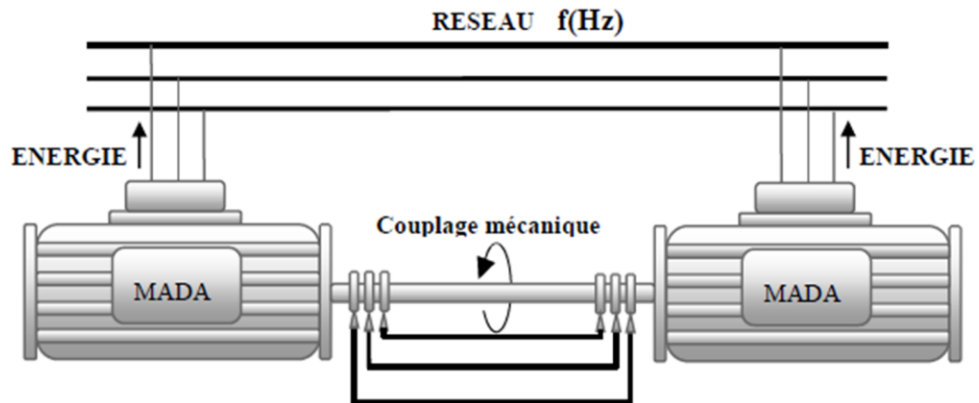
FIGURE 1-2. STRUCTURE DE LA MADA SANS BALAIS

Il existe d'autres types comme la MADA à réductance qui utilise le principe d'un moteur à réductance variable ainsi que la MADA "tandem" qui possède un rotor à cage et deux enroulements statoriques, l'un est fixe tandis que l'autre peut être tournant.

### 1.2.5 MADA en cascade :

La structure de la MADA en cascade est définie par deux machines asynchrones dont les rotors sont couplés électriquement et mécaniquement. Cette structure permet d'avoir un

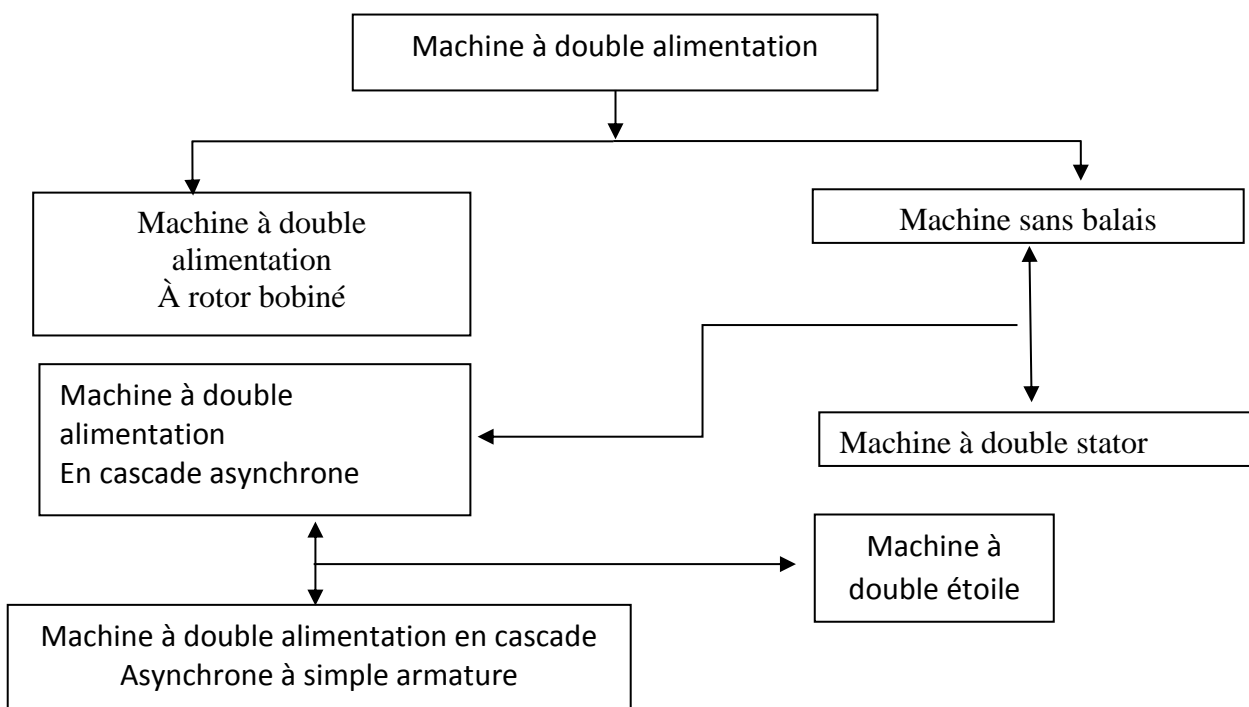
système à double alimentation coté stator. Les enroulements statoriques sont reliés à deux sources de tension triphasées.



**FIGURE 1-3.**STRUCTURE EN CASCADE DE DEUX MACHINES ASYNCHRONES

### 1.3 Classification des machines a doublé alimentation (MADA)

Les différentes variantes de la machine à double alimentation les plus attractives sont développées comme présenté ci-dessous. [3]



**FIGURE 1-4.** CLASSIFICATION DES MACHINES ELECTRIQUES A DOUBLE ALIMENTATION

### 1.4 Le principe de fonctionnement de la MADA

En admettant que l'enroulement statorique de la machine à double alimentation est connecté directement au réseau, que l'enroulement rotorique triphasé est relié à un

convertisseur de puissance bidirectionnel à travers un système balais-bagues et que les nombres de pôles du stator et du rotor sont identiques, la vitesse angulaire de rotation du rotor sera définie par :

$$\omega_m = \omega_s \pm \omega_r = p\Omega_m \quad (1.1)$$

Avec :

$\Omega_m$  : la vitesse mécanique du rotor ;

$\omega_m$  et  $\omega_r$  : les pulsation statoriques et rotoriques respectivement

$p$  : le nombre de paires de pôle.

Le signe positive (+) dans l'équation (1. 1) signifie que le champ tournant créé par les enroulements du stator tourne dans le même sens que celui créé par les enroulements du rotor ( $\omega_m < \omega_s$ ), (en régime hypo-synchrone). Le signe négative (-) signifie que le champ tournant créés par les enroulements du stator et du rotor tournent dans des sens opposés et que la machine fonctionne en régime hyper-synchrone. D'autre part, la relation qui relie la fréquence du stator et celle du rotor est donnée par :[4]

$$f_s = f_r + pf_m \quad (1.2)$$

Avec  $f_m$  :fréquence de rotation du rotor.

Dans ce cas le glissement est défini par :

$$g = \frac{f_r}{f_s} = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad (1.3)$$

D'après cette équation on peut distinguer quatre régimes de fonctionnement de la MADA [3]:

- **Stationnaire (g=1)** : le stator est alimenté directement par le réseau avec une Fréquence  $f_s$   
Le circuit rotorique est siège d'une force électromotrice induite avec une fréquence  $f_r$  identique à  $f_s$  . Dans ce cas, la MADA se comporte simplement comme un transformateur.
- **Hypo-synchrone (0<g<1)** : En tournant le rotor dans la direction du flux statorique, la fréquence  $f_r$  du rotor va commencer à décroître. Plus la vitesse du rotor s'approche decelle de synchronisme, plus  $f_r$  tend vers 0, de même la tension induite dans le rotor décroît linéairement et prend une valeur très faible pour une vitesse du synchronisme
- **Synchrone (g=0)** : Lorsque la vitesse mécanique du rotor atteint la vitesse de synchronisme, la fréquence  $f_r$  du rotor s'annule. Dans ce cas, le rotor tourne avec la même vitesse que celle du flux statorique, donc le rotor ne voit aucun mouvement relatif

par rapport à ce dernier, par conséquent il n'y a aucune tension induite dans les enroulements rotoriques.

- **Hyper-synchrone ( $g < 0$ )** : Par d'avantage d'accélération, le flux rotorique rattrape le flux statorique et la fréquence du rotor devient négative selon les équations (1.2) et (1.3). Cette valeur négative signifie que l'ordre de succession de phase du rotor «  $ar, br, cr$  » s'inverse. L'augmentation de la vitesse relative du rotor par rapport à celle du flux statorique mène à une augmentation de la tension induite du rotor.

### 1.4.1 Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA :

Contrairement à la machine asynchrone classique, qui ne peut fonctionner en moteur qu'en dessous de sa vitesse de synchronisme et ne peut être en générateur qu'au-dessus de cette vitesse, dans la MADA c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper synchronisme ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. On a donc quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine.

### 1.4.2 Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone

- La puissance est fournie par le réseau au stator.
- La puissance de glissement" est renvoyée au réseau.
- La vitesse de rotation est inférieure au synchronisme.
- La machine asynchrone à cage peut être fonctionné ainsi mais la puissance de glissant est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor [5].

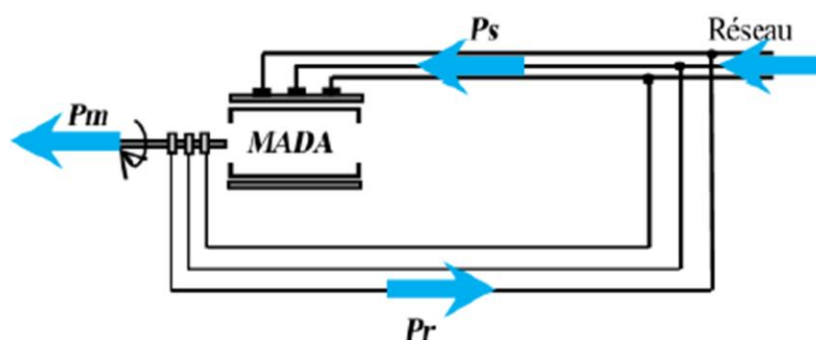


FIGURE 1-5.FONCTIONNEMENT EN MODE MOTEUR HYPO-SYNCHRONE

### 1.4.3 Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone :

- La puissance fournie par le réseau va au rotor et stator.
- La vitesse de la machine au-dessus de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement [6].

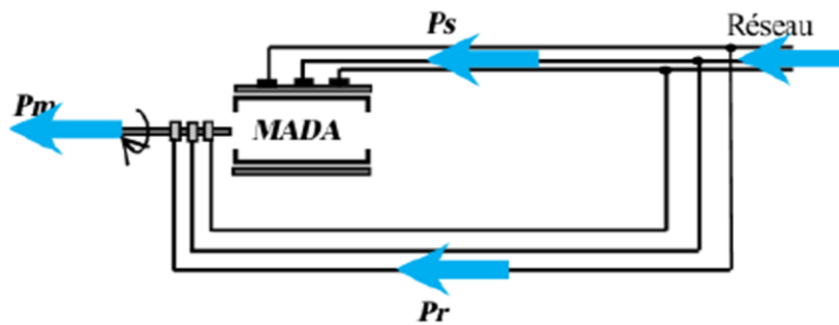


FIGURE 1-6.FONCTIONNEMENT EN MODE MOTEUR HYPER-SYNCHRONE

#### 1.4.4 Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone :

- La puissance est fournie au réseau par le stator.
- Une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.
- La vitesse de rotation en dessous de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement [5].

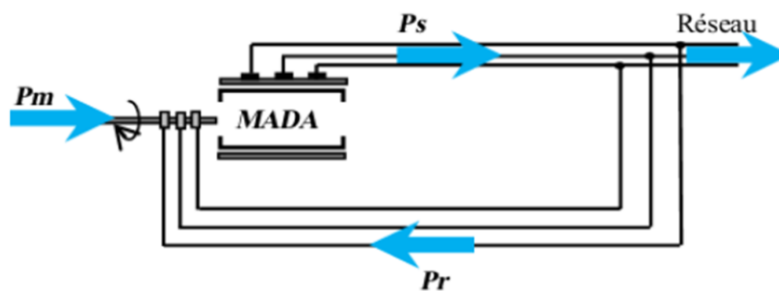


FIGURE 1-7.FONCTIONNEMENT EN MODE GENERATEUR HYPO-SYNCHRONE

#### 1.4.5 Fonctionnement en mode génératrice hyper-synchrone :

- La puissance est fournie au réseau par le stator.
- La puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau.
- La vitesse de la machine au-dessus de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone à cage peut être fonctionnée ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor [7]

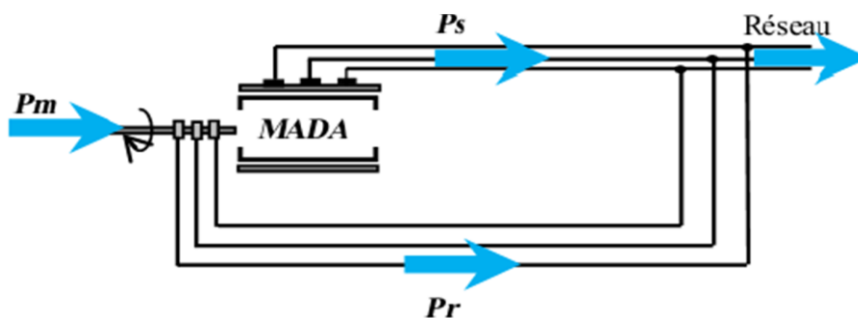


FIGURE 1-8.FONCTIONNEMENT EN MODE GENERATEUR HYPER-SYNCHRONE

Glissement $g$	Moteur hypo synchrone	Génératrice Hypo synchrone
$g > 0$	$P_s > 0$ $P_{mec} > 0$ $P_r = gP_s > 0$ $P_s > 0$	$P_s < 0$ $P_{mec} < 0$ $P_r = gP_s < 0$ $P_s < 0$
	Moteur Hyper synchrone	Génératrice Hyper synchrone
$g < 0$	$P_s > 0$ $P_{mec} > 0$ $P_r = gP_s < 0$ $P_s > 0$	$P_s < 0$ $P_{mec} < 0$ $P_r = gP_s > 0$ $P_s < 0$

TABLEAU 1-1 : LES CONDITION MATHEMATIQUE POUR CHAQUE MODE DE FONCTIONNEMENT DE LA MADA

## 1.5 Aperçus sur les configurations de la MADA à rotor bobiné :

Comme toutes les autres machines électriques à courant alternatif, la MADA peut fonctionner en moteur comme en génératrice. Chaque mode de fonctionnement est caractérisé par une configuration qui répond à un critère choisis. Dans cette partie du chapitre, on va citer les configurations les plus utilisées, selon la littérature, pour chaque mode de fonctionnement.

### 1.5.1 Configuration pour application moteur :

La variation de la vitesse des machines synchrones et asynchrones classiques nécessitent la variation de la fréquence des courants statoriques par l'intermédiaire d'un redresseur puis d'un onduleur. Généralement, ces deux convertisseurs sont dimensionnés pour faire transiter la totalité de la puissance nominale de la machine. L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille de ces convertisseurs d'environ 70%, en agissant sur l'alimentation des enroulements rotoriques [9].

### 1.5.2 Stator alimenté par le réseau, rotor alimenté par un onduleur :

Cette classe est dite MADA simple. Les enroulements statoriques sont connectés au réseau triphasé fixe, tandis que le rotor est relié à son propre onduleur (Single Doubly Fed Induction Machine).

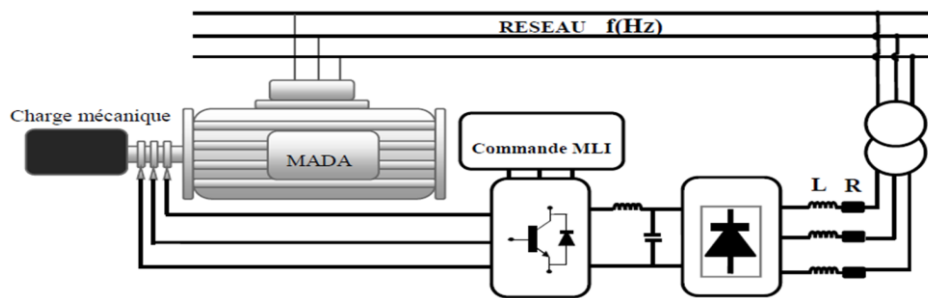


FIGURE 1-9.SCHEMA DE LA MADA DONT LE ROTOR EST ALIMENTE PAR UN ONDULEUR

Ce mode d'alimentation n'est pas adapté au fonctionnement à faibles fréquences rotoriques mais le fait de relier le stator au réseau et d'alimenter le rotor à travers un onduleur permet de dimensionner le convertisseur coté rotor à 30% de la puissance mécanique maximale [10].

### 1.5.3 Stator relié au réseau, rotor alimenté par un Cycloconvertisseur :

Le remplacement de l'association redresseur-onduleur par un cycloconvertisseur autorise un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau.

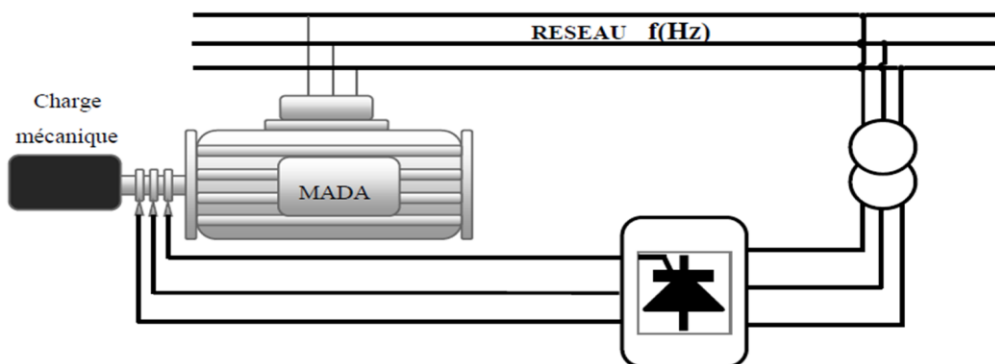


FIGURE 1-10.SCHEMA DE LA MADA DONT LE ROTOR ALIMENTE PAR UN CYCLOCONVERTISSEUR

Le principe du cycloconvertisseur est de prendre des fractions des tensions sinusoïdales du réseau afin de reproduire une onde de fréquence inférieure. Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cycloconvertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés [11].

### 1.5.4 MADA alimenté par deux convertisseurs indépendants :

Dans cette structure on trouve plusieurs configurations possibles. Le stator et le rotor sont alimentés soit :

- Deux cycloconvertisseurs.
- Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs.



- Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun.

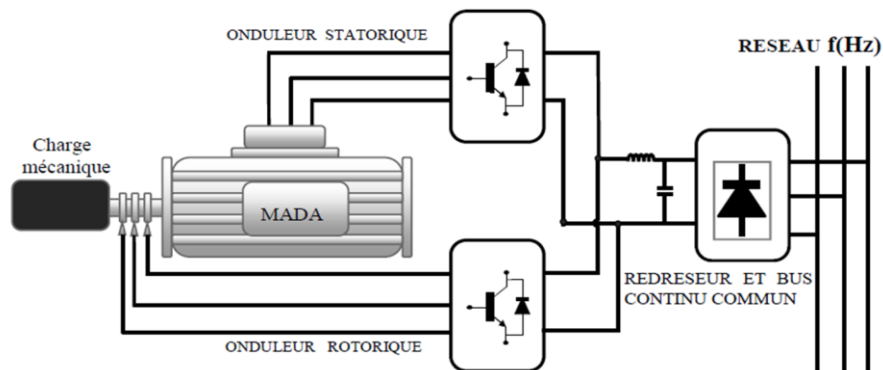


FIGURE 1-11. SCHEMA SYNOPTIQUE POUR L'ALIMENTATION PAR DEUX CYCLO CONVERTISSEURS

Grâce à ce type d'alimentation, la MADA possède quatre degrés de liberté ce qui rend son contrôle très souple. On peut donc réguler la vitesse (ou le couple), le flux (statorique, rotorique et d'entrefer), le glissement et le facteur de puissance [12].

### 1.5.5 Configuration pour application génératrice :

Dans cette partie, on s'intéresse à la MADA à rotor bobiné et son utilisation pour la production de l'énergie électrique à partir de l'énergie éolienne.

### 1.5.6 MADA à énergie rotorique dissipée :

Le stator est connecté directement au réseau tandis que le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur. L'ajout d'un hacheur à base d'IGBT permet de varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur [9].

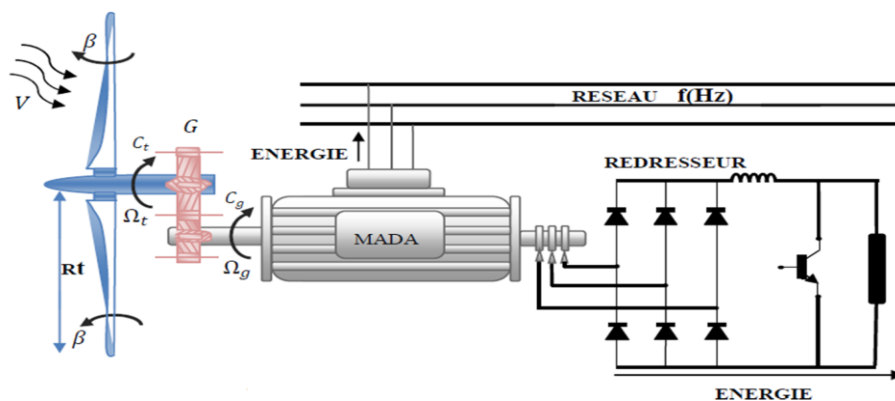
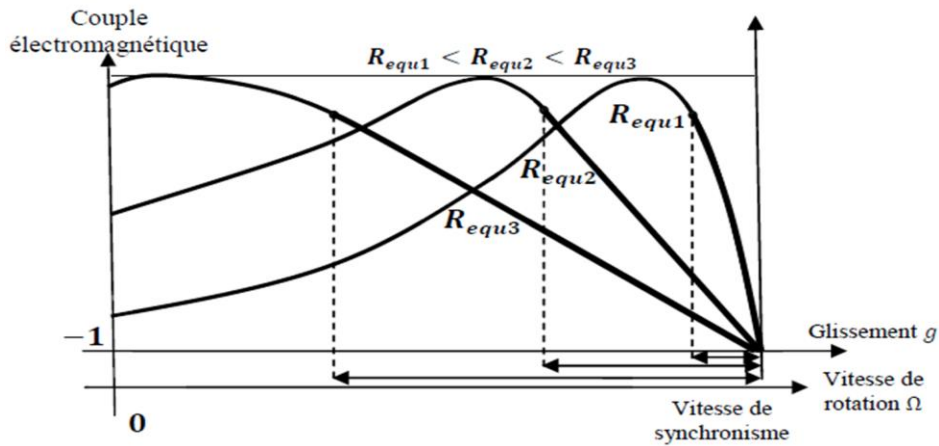


FIGURE 1-12. MADA A ENERGIE ROTORIQUE DISSIPÉE

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R, ce qui nuit au rendement du système.

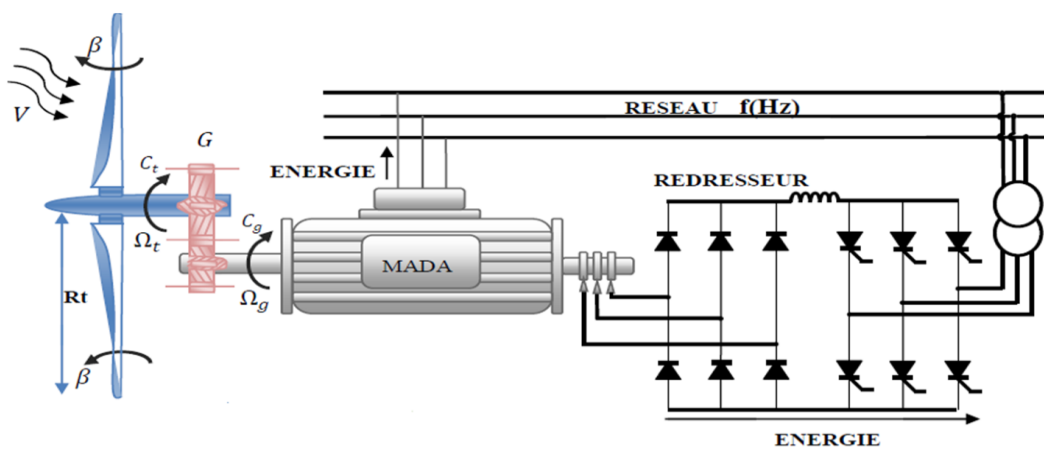


**FIGURE 1-13. EFFET DE LA VARIATION DE LA RESISTANCE ROTORIQUE SUR LE COUPLE ELECTROMAGNETIQUE**

**1.5.6.1 Structure de Kramer :**

Pour améliorer la structure du système précédent, tout en réduisant les pertes d'énergie, l'hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau.

Ce système permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. L'utilisation de thyristor pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau). Le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures à celle du synchronisme (hyper synchrone).



**FIGURE 1-14.MADA A STRUCTURE DE KRAMER**

1.5.6.2 Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur :

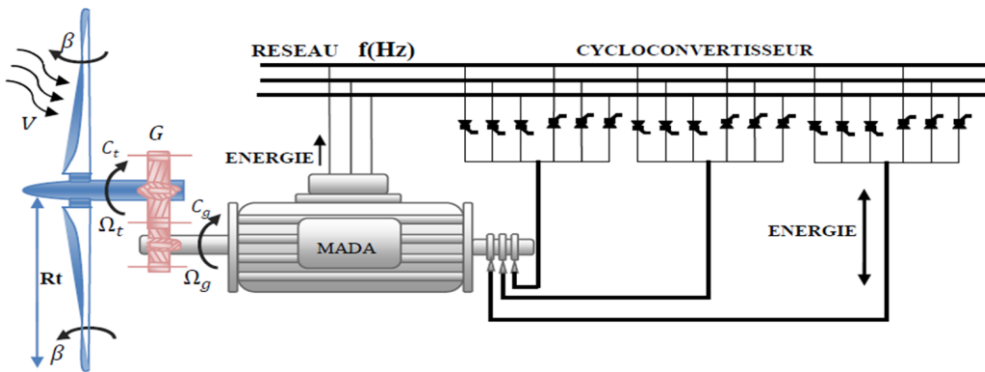


FIGURE 1-15. STRUCTURE DE SCHERBIUS AVEC CYCLOCONVERTISSEUR

Pour rendre la structure précédente réversible, en échange d'énergie entre le rotor et le Réseau, on remplace le redresseur et l'onduleur par un cycloconvertisseur. L'utilisation de cycloconvertisseur permet d'avoir une plage de la vitesse de rotation variant de  $\pm 30\%$  autour de la vitesse de synchronisme. L'inconvénient de cette structure est la génération des [13] Perturbations harmoniques importantes qui diminuent le facteur de puissance du dispositif .

1.5.6.3 Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI :

Le progrès de l'électronique de puissance permet d'avoir des interrupteurs qui peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture comme les IGBT's avec une fréquence de Commutation importante. L'utilisation des convertisseurs à base de ce type d'interrupteurs permet le rejet des premiers harmoniques vers les fréquences élevées ce qui limite les perturbations harmoniques et facilite le filtrage [13],[11].

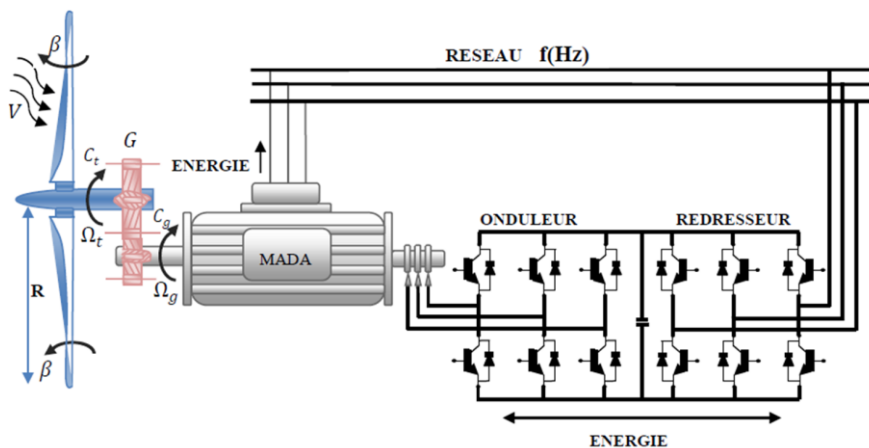


FIGURE 1-16. STRUCTURE DE SCHERBIUS AVEC CONVERTISSEURS MLI

### 1.6 Domaines d'application de la MADA :

Actuellement, la machine asynchrone à double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ces nombreux avantages.

En effet, la MADA peut être utilisée dans plusieurs applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, telles que : [2]

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines ;
- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime ;
- Et enfin l'application de levage, les ascenseurs, les monte-charges etc...

### 1.7 Avantages et inconvénients de la MADA :

Nous introduisons dans ce paragraphe les avantages et les quelques inconvénients que présente la machine asynchrone à double alimentation.

#### 1.7.1 Avantages de la MADA :

Comme avantages de la MADA, on peut citer : [14]

- L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance.
- La capacité de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse autour de la vitesse de synchronisme.
- L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70% en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des

Enroulements rotoriques. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur.

- Le partage des fréquences entre le stator et le rotor en effet dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs qui alimentent la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale.
- Le fonctionnement en hypo ou hyper synchronisme offre une large plage de variation de la vitesse.

### 1.7.2 Inconvénients de la MADA :

Tout d'abord, la MADA est une machine asynchrone ; alors le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande. En plus de cela, on peut citer les inconvénients suivants : [15]

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à cause des balais.
- Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus que celle de la machine classique.
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage.

### 1.8 Les différents travaux réalisés sur la MADA :

Parmi les travaux les plus significatifs, nous citons les suivants :

[16] : présente un contrôle vectoriel de deux machines asynchrones doublement alimentées (avec deux paires de pôles différentes) montées en cascade (*CDFM : Cascaded Doubly-Fed Induction Machine*). Le stator de la machine A est lié au réseau et le stator de la machine B est alimenté par un convertisseur statique. Les deux rotors sont reliés mécaniquement et électriquement suivant la FIGURE1.1 Il présente des résultats expérimentaux validant le fonctionnement choisi.

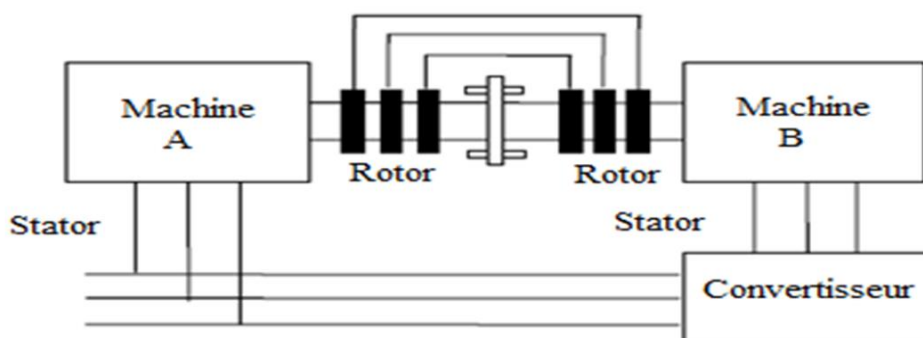


FIGURE 1-17. SCHEMA GENERAL DE PRINCIPE DE DEUX MADA MONTEES EN CASCADE

[16] : propose l'étude d'une MADA dont le stator est relié à un réseau triphasé, alors que le rotor est alimenté par un onduleur MLI associé à un redresseur. Il s'intéresse au fonctionnement en mode moteur et vise des applications à vitesse variable. Il adopte une commande vectorielle par l'orientation du flux statorique avec et sans capteur de position. Dans le cas de l'absence du capteur de position, il propose deux méthodes pour déterminer la

position angulaire du repère lié au flux statorique : une première basée sur la mesure et l'expression des composantes du courant statorique dans le repère tournant considéré, la seconde nécessite la mesure des puissances active et réactive statoriques. Ensuite, cette étude est validée par des résultats expérimentaux.

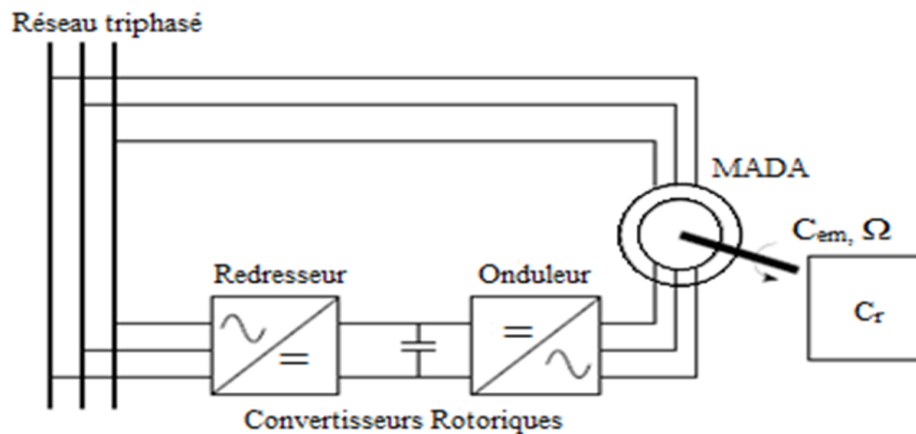


FIGURE 1-18. MADA FONCTIONNANT EN MOTEUR A VITESSE VARIABLE HAUTES PERFORMANCES

[12] : pour son étude a proposé une loi de répartition de puissance entre le stator et le rotor afin d'optimiser le dimensionnement des convertisseurs de puissance. Cette loi de répartition de puissance a amené à une loi de commande en vitesse de la machine à double alimentation en permettant un choix adéquat des pulsations rotorique et statorique. La loi de répartition de puissance a permis aussi d'avoir un fonctionnement en survitesse qui peut atteindre deux fois la vitesse de base. [19] : traite essentiellement de la commande vectorielle par orientation du flux statorique et la commande directe du couple des deux types de machines : Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) et Machine Asynchrone à Double Etoile (MASDE), elle essaie de répondre à un cahier de charges imposé par l'industrie surtout dans le cas des entraînements à vitesses variables. Elle a appliqué les deux méthodes de commande directe et indirecte. Ces résultats montrent que la régulation par la méthode directe présente des performances meilleures que celles présentées par la méthode indirecte en termes de temps de réponse et de rejet de perturbation. Le test de robustesse montre bien la sensibilité du contrôle de la vitesse par le régulateur PI aux variations paramétriques de la machine où le découplage est affecté.

[19] : traite du fonctionnement de la modélisation, du contrôle, d'une étude analytique et de l'optimisation des performances de la machine asynchrone à double alimentation. Il trouve

des lois de commande par différentes façons et pour plusieurs fonctions objectives qui peuvent optimiser les performances de la machine (rendement, facteur de puissance, taille du convertisseur). Il montre aussi que le mode de fonctionnement de la machine dépend principalement des caractéristiques de la source extérieure (tension, déphasage et fréquence).

[20] : Le cas de la machine asynchrone à rotor bobiné a été étudié, avec la configuration où son stator est directement relié au réseau et son rotor est alimenté par des convertisseurs de puissance. Pour cette machine une technique de commande en régime permanent a été développée selon le mode moteur ou générateur, pour le fonctionnement hypo ou hyper synchrones. Et cela en dérivant les lois de commande de la MADA en régime permanent en termes de tension rotorique  $V_r$  et de déphasage entre le courant et la tension au rotor  $1/J$ . Pour cela une approche analytique basée sur le circuit équivalent de la MADA avec les paramètres réels d'une machine de Lab\_Volt a été réalisée. Enfin un simulateur a été développé sous l'environnement Simulink de MATLAB afin de réaliser cette commande, et ainsi valider les résultats analytiques obtenus.[21] :

Le travail présenté est une contribution à la commande robuste de la machine asynchrone sans balais à double alimentation (BDFM). Différentes techniques de commandes ont été développées. La commande vectorielle par flux orienté et le contrôle direct du couple, utilisant des régulateurs conventionnels, ont été abordés en premier lieu. On remarque que ces deux techniques assurent le découplage des courants de la BDFM dans le repère (d-q). Puis, on s'est intéressé à la commande avancée de la BDFM. La commande floue et la commande par mode glissant ont été présentées, car elles assurent le découplage entre les puissances active et réactive et la robustesse lors des variations paramétriques. L'analyse détaillée du système de production d'énergie éolienne a été ensuite élaborée pour le mode de fonctionnement de la machine comme génératrice.

[22] : Le travail réalisé dans cette mémoire concerne l'étude et la commande du système éolien à base d'une machine asynchrone à double alimentation entraînée par une turbine à calage variable des pales, et pilotée à travers les variables rotoriques par deux convertisseurs bidirectionnels.

### 1.9 État de l'art du diagnostic de la machine asynchrone :

Les machines électriques sont très utilisées dans l'industrie et surtout la machine asynchrone qui, de par sa construction, est la machine la plus robuste et la moins chère du marché. La quasi-absence de son entretien a permis d'étendre son domaine d'utilisation à tous les domaines industriels et en particulier dans les domaines de pointe comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie ou encore les éoliennes. Malgré sa robustesse, cette machine subit, au cours de sa durée de vie, des sollicitations qui la rendent Potentiellement défaillante. Cette défaillance peut avoir de graves conséquences sur le processus industriel en général [23].

Dans les chaînes industrielles, le maillon faible est la machine électrique, car sa panne paralyse immédiatement la production et entraîne une perte sèche très importante.

Une maintenance dite « prédictive », doit être donc assurée afin de prévenir à temps les défauts susceptibles de se produire dans les machines (phase statorique mise en court-circuit, rupture de barres ou d'anneaux de court-circuit, excentricités, défauts de roulements,). Les études actuelles portent sur les petits défauts (par exemple : un court-circuit entre spires), ceci afin de prévenir les grands.

Généralement, le diagnostic des défauts est fait à partir du spectre des grandeurs électriques. Les fréquences de défaut dépendent non seulement du défaut, mais aussi du glissement et du choix de l'alimentation.

#### 1.9.1 Cause des défauts :

Les causes des défauts sont multiples. Elles peuvent être classées en trois groupes :

- Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), problèmes mécaniques, rupture de fixations, problèmes d'isolation, survoltage d'alimentation....
- Les amplificateurs des défauts : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, alimentation perturbé (instabilité de la tension ou de la fréquence), échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement....
- Les vices de fabrication et les erreurs humaines : défauts de fabrication, défektivité des composants, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine....



### 1.9.2 Présentation des défauts :

La machine asynchrone comporte une partie fixe appelée stator qui est constitué d'un enroulement triphasé placé dans les encoches du circuit magnétique et d'une partie mobile appelée rotor, qui est constituée soit d'une cage ou d'un enroulement court-circuité placé dans des encoches.

Dans ce qui suit nous allons présenter les différents défauts pouvant affecter la machine asynchrone.

On distingue deux types de défauts dans la machine asynchrone :

- Défauts affectant le stator.
- Défauts affectant le rotor.

#### 1.9.2.1 Défauts affectant le stator :

Ces défauts sont généralement liés à la dégradation de l'isolation électrique. Ils sont généralement connus comme des défauts de court-circuit entre une ou plusieurs phases et/ou la terre. Rappelons que les défauts statoriques peuvent être : des courts-circuits entre spires des enroulements de la même phase, ou de phases différentes, des courts-circuits phase-terre, ou une ouverture de phase, provoquant tous une dissymétrie au niveau du stator. (FIGURE 1.20).

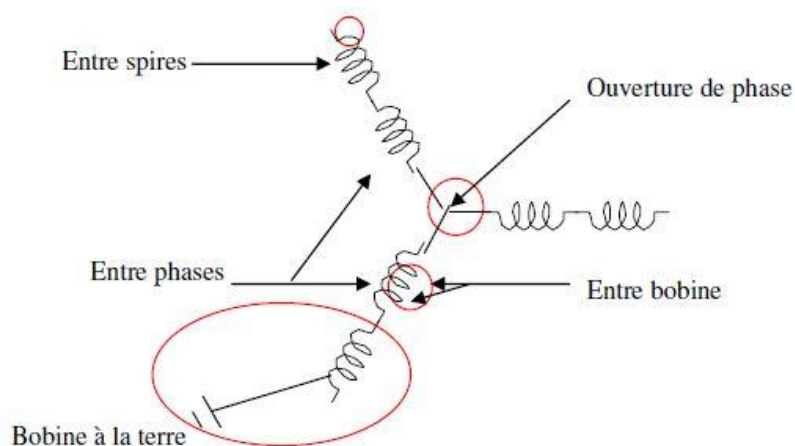


FIGURE 1-19.représentation des différents défauts statoriques possibles

A terme, ces défauts destructifs pour les couches de vernis protecteur des enroulements, conduisent à une machine déséquilibrée et à une modification de sa classe d'isolation.

Cette détérioration au niveau de l'isolation peut exister pour diverses raisons :

- \_ Une augmentation de la température des enroulements ou de l'armature statorique.
- \_ Déconnection des attaches des enroulements.

- \_ contamination due à l'humidité et à la saleté.
- \_ courts-circuits ou contraintes de démarrage.
- \_ décharges électriques

### 1.9.2.2 Défauts affectant le rotor :

On définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil.

#### 1.9.2.2.1 Rotor à cage d'écureuil :

Les défauts affectant ce type peuvent être :

#### 1.9.2.2.2 Défaut de rupture de barres ou d'anneau de la cage rotorique :

La détection de ce type de défaillances est souvent difficile vu le fait que la machine continue de fonctionner en présence de ces défaillances. Ces derniers ont par ailleurs un effet cumulatif. Le courant que conduisait une barre cassée, par exemple, se répartit sur les barres adjacentes. Ces barres sont alors surchargées, ce qui conduit à leurs ruptures, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres pour provoquer l'arrêt de la machine. Elles provoquent aussi une dissymétrie de répartition de courants au rotor et modifient la valeur du couple électromagnétique, qui va générer des vibrations et l'apparition de défauts mécaniques [24].

### 1.9.3 Défaut de roulements :

Ce type de défaut ainsi que sa détection est très peu mentionné dans la littérature des électrotechniciens. Les roulements se composent généralement de deux bagues, une intérieure et une autre extérieure, entre lesquelles existe un ensemble de bille ou de rouleaux tournants. En fonctionnement normal, la défaillance due à la fatigue commence par de petites fissures situées au-dessous des surfaces du chemin de roulement et de l'élément roulant, qui se propage graduellement sur la surface. Tout changement de l'uniformité du roulement produit des vibrations détectables et augmente le niveau du bruit.

### 1.9.4 Défauts d'excentricités :

L'excentricité de la machine est le résultat d'uniformité d'entrefer. Ce défaut peut apparaître suite à une flexion de l'arbre, un mauvais positionnement du rotor par rapport au stator, de l'usure du roulement ou encore d'un manque de précision lors de la construction de la machine. Il existe deux types d'excentricité (figure 1.21) :

### 1.9.4.1 L'excentricité statique :

Dans ce type d'excentricité, la position de l'épaisseur minimale de l'entrefer est fixe dans l'espace. Elle peut être causée par la forme ovale de la partie intérieure du stator ou encore par le mauvais positionnement du rotor ou du stator durant la phase de construction. Si cependant l'assemblage entre le rotor et l'arbre est suffisamment rigide, le niveau d'excentricité statique ne change pas.

### 1.9.4.2 L'excentricité dynamique :

Pour ce qui est de l'excentricité dynamique, le centre du rotor n'est pas en son centre de rotation, et de ce fait la position d'épaisseur minimale d'entrefer tourne avec le rotor. Les causes de ce type d'excentricité sont, la flexion de l'arbre du rotor, l'usure ou le défaut d'alignement du roulement, la résonance mécanique à la vitesse critique [25].

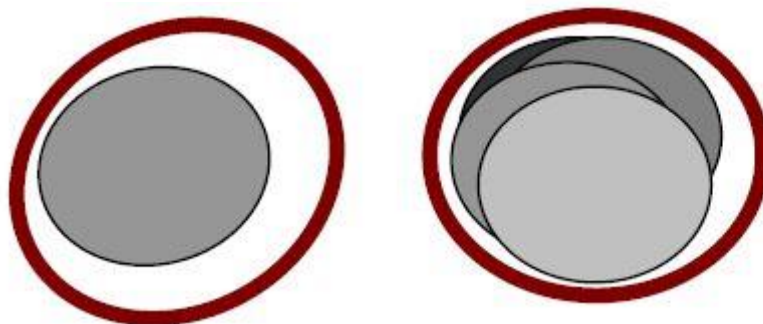


FIGURE 1-20. REPRÉSENTATION DE L'EXCENTRICITÉ STATIQUE ET DYNAMIQUE

Excentricité statique Excentricité dynamique

Plusieurs positions du rotor au cours de sa rotation

## 1.10 Rotor bobiné :

### 1.10.1 Défaut de courts-circuits :

Les spires court-circuitées dans les générateurs de puissance à rotor bobiné affectent le fonctionnement de la machine, provoquent des niveaux élevés de vibration ; et donc la détection précoce est importante [26].

Sachant que le bobinage triphasé du rotor est similaire à celui du stator ; donc les défauts qui peuvent affecter le bobinage rotorique est de même type que les défauts statoriques tels que des courts-circuits entre spires des enroulements de la même phase, ou de phases différentes, des courts-circuits phase-terre, ou une ouverture de phase, qui provoquent une dissymétrie au niveau du rotor.

### 1.10.2 Défaut de contact balai – bague :

Le défaut de contact balai-bague introduit une différence (déséquilibre) de résistances entre les trois phases rotoriques. Ce qui influe sur les performances du système parce que la commande est sensible à la constante de temps rotorique et augmente les pertes.

## 1.11 Méthodes de diagnostic utilisées pour détecter les défauts de la machine

### 1.11.1 Méthodes sans modèle :

Ces méthodes sont basées soit sur le traitement de signaux issus de capteurs de grandeurs physiques affectées par les défauts ou soit par des systèmes experts mettant en œuvre des techniques d'intelligence artificielle. Puisque les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'information, on est obligé d'aller vers les techniques de traitement de signal.

Les méthodes se basant sur l'analyse des signaux d'acquisition ont l'avantage d'être indépendante des fluctuations internes du système. Ainsi, l'information contenue dans les signaux n'est pas affectée par une éventuelle erreur de modélisation.

Plusieurs techniques de traitement de signal ont été utilisées depuis longtemps pour analyser le contenu spectral des différents signaux issus des machines électriques tels que : les courants, les puissances, le couple, la vitesse, le flux, les vibrations, etc. Dans ce qui suit, on présente brièvement les transformées de Fourier rapide (FFT).

#### 1.11.1.1 Diagnostic par analyse des vibrations mécaniques :

Le diagnostic des défauts en utilisant la vibration mécanique est la méthode la plus utilisée dans la pratique. D'après [28], [29], les forces radiales, créées par le champ d'entrefer, provoquent des vibrations dans la machine synchrone. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique.

$$\sigma(\theta, t) = \frac{B_s^2(\theta, t)}{2\mu_0}$$

La distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer est le produit de la force magnétique  $F_{mm}$  et de la perméance (P).

$$\Psi_s = F_{mm} \cdot P$$

Les vibrations de la machine peuvent être captées par des accéléromètres placés sur les paliers selon les directions axiale, verticale et radiale. Les spectres des signaux de vibrations issus du moteur avec défaut sont comparés avec ceux de références enregistrées lorsque la machine était en bon état. Cette méthode permet la détection aussi bien des défauts

électriques que mécaniques puisque la force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor et la perméance dépend de la variation de l'entrefer. Cependant, le cout des capteurs de variation qui est relativement élevé, ainsi que les difficultés rencontrées dans la connexion de ces capteur (problème d'accessibilité) représentent les limites et les inconvénients de cette méthode.

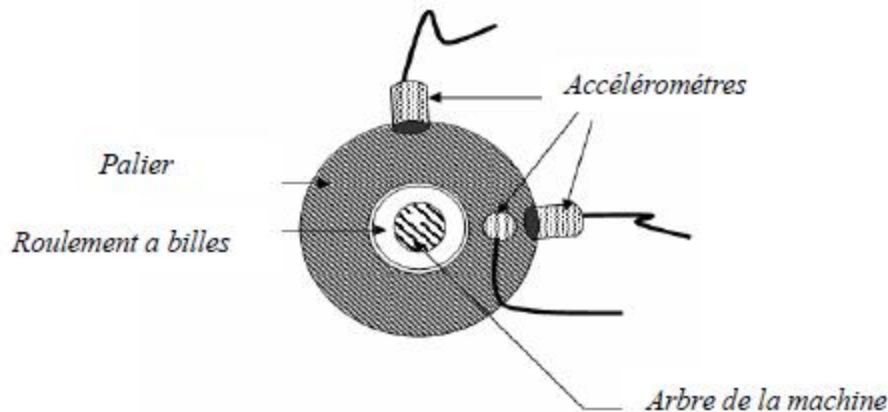


FIGURE 1-21. MESURES VIBRATOIRES SUR LA MACHINE ASYNCHRONE

### 1.11.1.2 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite :

Dans une machine idéale sans défauts, les courants et les tensions statorique sont équilibrés, ce qui annule le flux de fuite axial. La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator ce qui donne naissance a des flux de fuite axial de valeurs dépendantes du degré de sévérité du défaut. Si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le contenu spectral de la tension induite dans cette bobine, peut être exploité pour détecter les différents défauts [30].

### 1.11.1.3 Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites :

Cette technique est basée sur l'exploitation du contenu fréquentiel de la tension induite par le flux rotorique dans les enroulements statorique pendant la déconnexion de la machine du réseau. En utilisant cette approche, les effets de non idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques) ainsi que le non linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être évitées [31].

### 1.11.1.4 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique développé dans la machine, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique [32].

L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé de la machine [30].

### 1.11.1.5 Diagnostic par mesure de la puissance instantanée :

La puissance instantanée est la somme des produits des courants et des tensions dans les trois phases statoriques. Donc, le niveau d'informations apportées par cette grandeur, est plus grand que celui apportées par le courant d'une seule phase. Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres [30].

L'utilisation de la puissance instantanée pour la détection des défauts dans la machine asynchrone a fait l'objet de nombreux travaux [33],[34].

### 1.11.1.6 Diagnostic par analyse du courant statorique :

Parce qu'il est facilement accessible, et vu sa capacité de détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques, l'analyse du courant statorique occupe une place privilégiée dans le diagnostic par analyse des signaux. Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (MotorCurrent Signature Analysis). La MCSA était l'objet de plusieurs travaux de recherche, elle consiste à affecter à chaque défaut une signature spectrale le caractérisant. Dans le même contexte, il a été démontré que la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère, et notamment, des raies déjà présentes dans le moteur sain (harmoniques d'espace) [35].

### 1.11.1.7 Diagnostic par analyse du vecteur de Park :

Deux versions d'analyse par cette méthode à savoir :

La première utilise les grandeurs biphasées  $is\alpha$  et  $is\beta$ , qui sont calculées à partir des trois courants d'alimentation, pour l'obtention de la courbe de Lissajous:  $is\beta = f(is\alpha)$ . Le changement de l'épaisseur et de la forme de cette courbe donne une information sur le défaut [36].

La deuxième est appelée Vecteur de Park Étendu, qui est basée sur l'analyse spectrale du module du vecteur de Park  $\sqrt{is\alpha^2 + is\beta^2}$ . Elle présente beaucoup d'avantages quant à la détection des défauts statorique ou rotorique et même les défauts de roulement [36].

### 1.11.1.8 Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle AI :

En dépit des diverses techniques mentionnées précédemment, ces dernières années, la surveillance et la détection de défaut des machines électriques se sont éloignées des techniques traditionnelles pour s'orienter vers des techniques dites d'intelligence artificielle.

Ces méthodes sont basées sur la connaissance a priori du système et utilisent un ensemble de règles et de faits (données manipulées par les règles) qui constituent ce qu'on appelle la base de connaissance. Parmi ces méthodes, on peut citer [37] :

1. Logique floue,
2. Réseaux neuronaux,
3. Reconnaissance des formes.

### 1.12 Méthodes du diagnostic à base du modèle

Deux approches peuvent être utilisées pour diagnostiquer les défauts à partir des modèles paramétriques.

- La première repose sur le suivi des paramètres électriques caractérisant les modèles. Il s'agit de détecter un écart entre l'évolution des paramètres au cours d'un fonctionnement sain et celle suivie par le système en présence de défauts. L'identification des paramètres peut se faire hors ligne. Elle se base alors sur un algorithme d'optimisation de l'erreur entre les paramètres du modèle et ceux du système étudié [38], [31]. Les paramètres peuvent être aussi identifiés en cours de fonctionnement à l'aide d'observateurs étendus. Le plus couramment utilisé est le Filtre de Kalman.
- La deuxième approche consiste à analyser les résidus générés à partir d'un modèle proche du système à surveiller. Le modèle de processus est constitué de relations de contraintes dynamiques liant deux types de variables des variables inconnues (variables internes, perturbations, entrées inconnues, ...) et des variables connues (consignes, variables mesurées). Les résidus sont théoriquement nuls en fonctionnement normal et différents de zéro lorsque 'une défaillance survient .la difficulté majeure consiste à faire la liaison entre le résidu 2tabli et un défaut particulier.

### 1.13 Traitement de signaux

Pour effectuer le diagnostic d'une installation, les opérateurs de maintenance analysent un certain nombre de symptômes tels que le bruit, la température, les vibrations, etc. En s'appuyant sur leur expérience. Ces symptômes ne sont que la manifestation flagrante d'une modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles d'un certain nombre de grandeurs mesurables.

Toutes les méthodes de traitements de signal disponibles pour le diagnostic des machines tournantes peuvent être classées dans cinq groupes différents :

### **1.13.1 Analyse spectrale**

L'analyse spectrale est certainement la méthode la plus naturelle pour le diagnostic des barres cassées. En règle générale, la seule grandeur intéressante accessible au stator est le courant et l'intérêt de son analyse spectrale est de pouvoir détecter et identifier l'élément défectueux en fonction de sa fréquence.

### **1.13.2 Analyse cepstrale**

Le sceptre est une anagramme du mot 'spectre' la raison de ce choix tient à ce qu'on obtient le cepstrum en effectuant une analyse spectrale supplémentaire sur le spectre fréquentiel du signal observé. Le cepstre est plus particulièrement utilisé dans les analyses vibratoires des machines tournantes. Les principales applications concernent la détection des défauts dans les roulements, les turbines ou encore les engrenages. [27]

## **1.14 Les méthodes de détection de fréquences connues**

Ces méthodes reposent sur le principe que les défauts se caractérisent par l'apparition ou le renforcement d'une raie à une fréquence fixe ou proportionnelle à la vitesse de rotation de la machine.

### **1.14.1 Méthodes temps-fréquence**

Les méthodes d'analyse temps-fréquence ont été développées pour l'étude des signaux non-stationnaires. Plus généralement elles s'appliquent à des signaux dont le contenu fréquentiel ou les propriétés statistiques évoluent au cours du temps. Pour décrire cette évolution temporelle il faut réaliser une analyse spectrale évolutive

### **1.14.2 Méthode temps-échelle :**

Ce mode de représentation est utilisé pour détecter des phénomènes qui se déroulent sur des échelles de fréquence différentes rencontrées dans un signal.

## **1.15 Conclusion :**

La machine asynchrone doublement alimentée est utilisée dans diverses applications soit en mode moteur ou en mode générateur. La MADA représente une nouvelle solution dans le domaine des entraînements de forte puissance, notamment ceux exigeant un large domaine de fonctionnement étendu à puissance constante et une grande plage de variation de la vitesse comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime.

L'objectif de ce chapitre était consacré de manière générale sur une généralité de la machine asynchrone double alimentation et le principe de fonctionnement et la structure de



## **Chapitre01 : Généralités et Principe de Fonctionnement de la MADA.**

---

la MADA, ensuite nous avons présenté les principaux Défaut qui peuvent gêner le fonctionnement Normal de la machine ainsi les causes probables et nous avons distingué les déferont méthode de diagnostic du défaut électrique et mécanique.

**CHAPITRE 02 :**  
**Modélisation de la MADA par la méthode des**  
**éléments finis**

### 2.1 INTRODUCTION :

La modélisation par la méthode des éléments finis "Finite Elément Méthode" (FEM), retenue parmi toutes les méthodes de modélisation utilisée pour la détection des différents défauts dans la machine de type asynchrone, offre un espace d'harmonique plus proche de celui de la machine réelle. Ceci permet une application fiable de la technique d'analyse des différents signaux de la machine. Une grande partie de ce chapitre sera consacré à cette modélisation avec une présentation détaillée des étapes nécessaires pour construire un modèle des éléments finis de la machine asynchrone double alimentation.

Dans notre travail, la détection des défauts dans la machine sera effectuée à travers la technique d'analyse des signatures du courant statorique "MotorCurrent Signature Analysis" (MCSA). Selon Joksimovic [41\_42] la technique d'analyse spectrale du courant statorique ou bien d'un autre signal dans la machine à diagnostiquée nécessite une connaissance précoce très forte et sûre du contenu spectral de ces signaux à l'état sain, d'ailleurs cette technique par principe compare le contenu spectral du signal choisi à l'état sain avec le contenu spectral du signal à l'état défaillant.

Par analogie, le sang dans le corps humain joue le rôle du courant statorique dans la machine, alors dans la majorité des cas la détection des anomalies dans le corps humain s'effectue à partir de l'analyse sanguine, et la détection se fait soit par l'injection des nouvelles composantes dans le contenu du sang ou bien par la modification dans les composantes du sang. Cette opération nécessite néanmoins une connaissance parfaite des normes et un bilan sanguin à l'état sain, ainsi que les conditions de vie et le régime alimentaire lors de la prise du sang. Pour le courant statorique, la détection du défaut se fait soit par l'injection de nouveaux harmoniques qui caractérisent le défaut, ou bien par la perturbation d'anciens harmoniques dans le spectre. Tout comme dans l'homéostasie du corps humain où l'alimentation et le style de vie influencent les équilibres vitaux ; les conditions de fonctionnement de la machine tel que l'effet de la charge, et le type de circuit d'alimentation influent fortement sur le contenu spectral du courant statorique.

### 2.2 Méthodes de modélisation de la machine asynchrone double alimentation :

A ce jour, les modèles qui décrivent le fonctionnement de la machine asynchrone double alimentation peuvent être décomposés en deux parties bien distinctes :

- les modèles dits "physiques".
- les modèles dits "comportementaux".

En ce qui concerne les modèles physiques, ce sont les lois régissant l'électromagnétisme qui sont utilisées pour décrire le fonctionnement de la machine. Ces modèles sont divers et peuvent varier en complexité et/ou en précision selon la méthode de modélisation utilisée [25]. Nous ne les citerons pas tous mais nous pouvons énoncer les plus populaires dont ceux basés sur :

- la méthode des éléments finis.
- la méthode des réseaux de perméance.
- la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés.

Les modèles comportementaux, quant à eux, reprennent les modèles physiques en y incluant des paramètres supplémentaires. Ces paramètres permettent la détection, et pour certains d'entre eux, la localisation du défaut observé. Nous introduisons alors une description exhaustive de ces différentes méthodes de modélisation pour permettre une compréhension adéquate des problèmes propres à chacune d'entre elles.

### 2.2.1 Méthode des réseaux de perméance

La méthode des réseaux de perméance est basée sur la décomposition en tubes de flux élémentaires du circuit magnétique de la machine asynchrone. Chaque tube ainsi obtenu est caractérisé par sa perméance suivant qu'il se trouve dans le fer ou dans l'air. A partir de cette décomposition, on construit un réseau dit de perméance. Ces réseaux peuvent être assimilés à un circuit électrique habituel à la différence près que ce sont les flux et les différences de potentiels magnétiques qui entrent en jeu à la place des courants et des différences de potentiels électriques. Cette approche permet de prendre en compte les caractéristiques du fer utilisé pour la construction de la machine. En effet, le calcul des différentes perméances ne peut se faire qu'en fixant une valeur précise pour la perméabilité relative du fer  $\mu_r$ . Le mouvement de rotation de la machine est pris en compte par l'intermédiaire de perméances d'entrefer variables selon la position du rotor de la machine.

### 2.2.2 Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés

Les inductances propres et mutuelles entre le stator et le rotor de la machine prennent une place importante dans cette méthode de modélisation car elles contiennent la signature des différents phénomènes pouvant apparaître au sein de la machine. Une modélisation

précise de ces inductances mènera à un apport d'informations supplémentaires sur les signaux tels que le courant statorique ou encore la vitesse rotorique. Cette approche offre un bon compromis en termes de précision du modèle et de temps de calcul. De plus, ce type de modélisation permet de prendre en compte un certain nombre de défauts d'origine électromagnétique tels que les défauts de court-circuit entre spires statoriques, les défauts de type rupture de barre rotorique et/ou de portion d'anneau de court-circuit. Nous pouvons aussi intégrer à ce type de modèle les défauts d'excentricité statique et dynamique et défauts déséquilibre.

### 2.2.3 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est une approche qui requiert un temps de calcul important. Le circuit magnétique de la machine est découpé en plusieurs éléments de dimension faible pour permettre de considérer le matériau magnétique linéaire sur les surfaces correspondantes. L'utilisation des équations de Maxwell, à partir des formes locales, permet de résoudre le problème. La résolution analytique correspondante est complexe et ne permet de traiter le phénomène de saturation que de façon approchée [26]. De nombreux logiciels ont vu le jour pour permettre d'aborder cette approche difficile. Nous pouvons citer Flux 2D, Flux 3D ou encore Maxwell. Le but principal de ces logiciels est, rappelons-le, de déterminer la cartographie du champ magnétique présents dans les machines électriques dans l'objectif d'optimiser le dimensionnement de ces dernières.

Cette méthode est basée sur la résolution numérique des équations de Maxwell. Les Informations fournies par ce type de simulation sont d'une grande précision et elles nous Apportent la prise en compte de la géométrie de la machine, l'effet de saturation des matériaux Magnétiques, les effets d'harmoniques de l'espace ainsi que l'effet de peau dans les barres Rotoriques, lorsque le problème est correctement posé (géométrie, physique, lien avec les équations de circuit...) et que l'on utilise le mode de résolution adéquate (magnétostatique, magnétodynamique, magnétique évolutif). D'autre part, d'un point de vue pratique, il est très facile de faire varier les conditions de fonctionnement de la machine (fréquence et flux magnétisant), en modifiant, directement, les paramètres dans le programme du calcul (Logiciel) d'où une grande souplesse d'utilisation [45], [46].

### 2.2.4 Implémentation de la méthode des éléments finis

La mise en œuvre de la méthode des éléments finis débouche inévitablement sur un logiciel qui lui est associé. Si, lors des premières tentatives de calcul par la méthode des éléments

finis, on écrivait, pour chaque nouveau problème, un programme différent tenant compte de sa géométrie particulière, de ses particularités physiques et de ses conditions aux limites, on s'oriente aujourd'hui vers la réalisation de logiciels généraux dont la structure informatique est adaptée au traitement d'un grand nombre de problèmes d'un même type. Ces logiciels ont pratiquement tous la structure représentée sur la figure 2.4 qui consiste en un programme séparé en quatre grands blocs : le pré processeur, le maillage, le solveur et le post processeur.

### 2.3 Modèle éléments finis de la machine asynchrone double alimentation a rotor bobiné

#### 2.3.1 Formulations

Considérons un certain domaine ( $\Omega$ ) dans lequel un champ  $A$ , scalaire ou vectoriel, est la solution de l'équation aux dérivées partielles suivante [44] :

$$\checkmark \quad D(A) = F \quad (2.1)$$

Où  $D$  est un opérateur différentiel et  $F$  est une fonction connue, appelée terme de source.

Pour spécifier entièrement le champ  $A$ , il faut tenir compte des conditions aux limites  $\Gamma$  du domaine ( $\Omega$ )

$$L(A) = G \frac{\partial A}{\partial t} + HA \quad (2.2)$$

Dans cette équation et  $H$  sont des fonctions connues sur les frontières  $\Gamma$ . Il en est donc de même de la fonction  $L$ . On peut distinguer deux cas particuliers importants :

1- Si la fonction  $G$  est nulle, on aura une condition de Dirichlet imposant la valeur du champ  $A$  sur la frontière  $\Gamma$  :

$$L(A) = HA \quad (2.3)$$

2- Si la fonction  $H$  est nulle, on aura une condition de Neumann imposant la valeur de la dérivée du champ  $A$  par rapport à la normale extérieure à la frontière  $\Gamma$  :

$$L(A) = G \frac{\partial A}{\partial t} \quad (2.4)$$

La solution de l'équation (2.1) compte tenu des conditions aux limites (2.2) peut être obtenue par une méthode de résolution numérique. La résolution numérique basée sur la méthode des éléments finis consiste à associer à celle-là un découpage du domaine  $\Omega$  en sous domaines élémentaire  $\Omega_e$  dans lesquels le champ  $A$  est, habituellement, approximé par une

## CHAPITRE 02 : Modélisation de la MADA par la méthode des éléments finis

fonction polynomiale. Cela va se traduire par une transformation des équations différentielles en un système d'équations algébriques dont la résolution nous permet de déterminer la distribution du champ A dans le domaine  $\Omega$ .

Dans les machines électriques les équations qui régissent le champ électromagnétique sont les équations de Maxwell associées aux relations constitutives du milieu considéré.

On les définit comme suit :

Les relations de couplage électromagnétique :

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.05)$$

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.06)$$

Les relations de la conservation des flux :

la relation régissant les propriétés des matériaux magnétiques :

$$\text{div}\vec{D} = \rho \quad (2.07)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (2.08)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.09)$$

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (2.10)$$

La relation de la loi d'Ohm :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.11)$$

$\vec{H}$ : champ magnétique  $\left(\frac{A}{m}\right)$

$\vec{E}$ : champ électrique (V/m)

$\vec{B}$ : Induction magnétique (T)

$\vec{B}_r$ : induction rémanent des aimants (T)

$\mu$  : perméabilité magnétique (H/m)

$\sigma$  : conductibilité électrique ( $\Omega^{-1} * m^{-1}$ )

### 2.3.2 Le modèle employé

Selon les résultats escomptés et le temps de simulation dont on dispose, trois modes de résolutions peuvent être employé :

#### 2.3.3 Le mode magnétostatique

Ce mode ne pourra donc être utilisé que pour simuler un instant donné d'un fonctionnement essentiellement à vide (sans courant induits) de la machine car il imposée

## CHAPITRE 02 : Modélisation de la MADA par la méthode des éléments finis

connaître les valeurs des courants dans les différentes barres du rotor. On s'en servira essentiellement pour la détermination de l'inductance magnétisante du moteur. Dans ce mode les sources sont indépendantes du temps. Le terme  $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$

Par conséquent, les équations du modèle deviennent :

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{J} \quad (2.12)$$

$$\overrightarrow{div} \vec{B} = 0 \quad (2.13)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (2.14)$$

La condition (2.9) permet de définir une fonction en vecteur potentiel A telle que :

$$\vec{B} = \overrightarrow{rot} \vec{A} \quad (2.15)$$

Pour que A soit totalement définit, il faut également fixer la valeur de sa divergence. On ajoute alors la condition  $div(A) = 0$  appelée jauge de Coulomb. Qui vérifiée automatiquement l'unicité de la solution.

Par la substitution de (2.15) et (2.14) dans (2.12) nous obtenons l'équation électromagnétique en magnétostatique, exprimée par le système d'équations suivant :

$$\overrightarrow{rot}(v \overrightarrow{rot} \vec{A}) = \vec{J} + \overrightarrow{rot}(v \cdot \vec{B}_r) \quad (2.16)$$

Où

$v = 1/\mu$ : est la réflectivité magnétique.

### 2.3.4 Le mode magnétodynamique

Ce modèle s'applique aux dispositifs qui ont des sources du courant ou de la tension variant en fonction du temps, Le terme  $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$  n'est pas nul. Et qui suppose la densité de courant sinusoïdale, et simule en régime permanent. Ce qui permet d'obtenir des valeurs convenables du courant efficace. Ce mode pourra être utilisé pour étudier un schéma équivalent de la machine. Le système à résoudre est le suivant :

$$\overrightarrow{rot}(v \overrightarrow{rot} \vec{A}) + j\omega \sigma \vec{A} = \vec{J} \quad (2.17)$$

$\omega = 2\pi f$ : pulsation électrique ( $rad.s^{-1}$ ),  $j$ : unité imaginaire ( $j^2 = -1$ )

### 2.3.5 Le mode magnétique transitoire

Il est le plus complet, Il traduit fidèlement la rotation du moteur. Dans ce cas l'alimentation est en courant transitoire, le traitement du système des équations caractéristiques précédentes, nécessite une discrétisation pas à pas dans le temps.

Donc le système à résoudre est le suivant :



$$\overrightarrow{rot}(v\overrightarrow{rot}\vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{rot}\vec{B}_r + \sigma \overrightarrow{grad}V = 0 \quad (2.18)$$

**2.3.6 Le principe de la MEF**

Le principe fondamental de la méthode des éléments finis réside dans le découpage du domaine d'étude en domaines élémentaires de dimension finie. Sur chaque domaine appelé élément fini, Le vecteur potentiel, dans un élément de découpage peut être approchée par des fonctions d'approximations (dites fonctions de formes), dont l'expression varie d'un type à un autre. Ces fonctions d'approximations doivent assurer la continuité du potentiel aux interfaces des éléments. La majorité des formes d'approximations du potentiel dans un élément sont des approximations polynomiales [34].

Pour un élément triangulaire on a :

$$Ae(x, y) = a + bx + cy \quad (2.19)$$

Pour les éléments quadrilatéraux on a :

$$Ae(x, y) = a + bx + cy + dxy \quad (2.20)$$

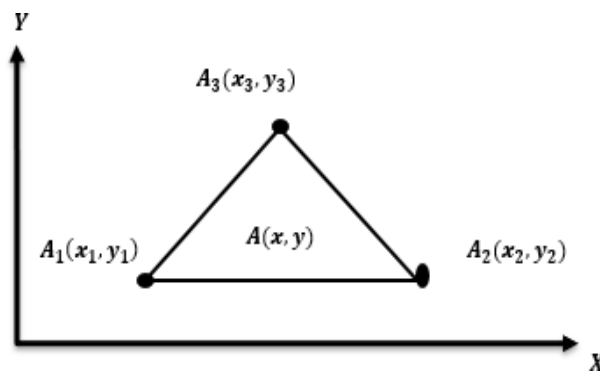
Les constantes  $a$   $b$   $c$  et  $d$  sont à déterminer. Le potentiel  $A_e$  est en générale non nul dans l'élément et nul ailleurs. La valeur approchée du potentiel dans un point du domaine ( $\Omega$ ) de résolution est donnée par :

$$A(x, y) = \sum_{e=1}^{n_e} A_e(x, y) \quad (2.21)$$

$e$  : Numéro d'élément.

$n_e$ : Le nombre totale des éléments du domaine ( $\Omega$ ).

Le potentiel en tous points d'un élément ainsi que la densité de courant sont parfaitement définis par les valeurs des potentiels de ses trois sommets (Figure. 2.1).



**FIGURE 2-1. FONCTION D'INTERPOLATION D'UN ELEMENT**

## CHAPITRE 02 : Modélisation de la MADA par la méthode des éléments finis

---

Les logiciels à éléments finis modernes sont souvent à structure modulaire où les différentes étapes de résolution [48] :

- Introduction des données géométriques et des propriétés physiques.
- Maillage.
- Résolution.
- Exploitation des résultats.

Sont séquentiellement exécutées.

Les modules associés à ces tâches doivent pouvoir être séparément accessibles. Ainsi, une géométrie discrétisée pourra servir à traiter plusieurs cas où seules les sources d'excitation ou les conditions aux limites sont modifiées. Lors d'une optimisation de formes, l'utilisateur doit également pouvoir faire varier un paramètre géométrique sans devoir refaire le maillage ou réintroduire les conditions aux limites.

Toutefois, en utilisant une Méthode des Eléments Finis conventionnelle, il serait difficile de calculer les performances de la machine tenant compte à la fois des courants de Foucault induits dans les conducteurs massifs, des non-linéarités des matériaux magnétiques et des sources externes.

C'est dans cette perspective que nous avons opté pour une nouvelle formulation, mieux adaptée pour notre problème : il s'agit d'une méthode dite directe permettant de résoudre simultanément les équations couplées du champ magnétique et des circuits électriques. Cette formulation est implantée dans le logiciel d'éléments finis Flux-2D.

### 2.3.7 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 particulière dite " bande de roulement " 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 :

- ✓ **Module Construction (Preflux)**

## CHAPITRE 02 : Modélisation de la MADA par la méthode des éléments finis

---

Il contient trois fonctions :

- (**geometry&physics**) ; permet de définir la géométrie et le maillage du dispositif à étudier, de déterminer le type du problème (magnétostatique, magnétodynamique ou transitoire) et associer des matériaux et des propriétés (magnétiques et électriques) à chaque élément de la géométrie.
- (**Circuit**) définit le schéma et les données du circuit électrique.
- (**Materials data base**) permet de choisir et de construire une banque de matériaux.

Ce module assure aussi le couplage entre le circuit magnétique et le circuit électrique d'alimentation.

### ✓ **Module Solving Process**

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

### ✓ **Module Analysis**

Permet, entre autres, de tracer les équipotentielles ou les lignes de flux, le maillage, la géométrie et les courbes 2D ou 1D selon un chemin prédéfini. Il permet aussi de calculer des grandeurs globales telles que le couple ou la force appliqués à un contour fermé, les inductions, les flux, les inductances, etc.

L'enchaînement de ces modules de Flux 2D est schématisé par la figure 2.2.

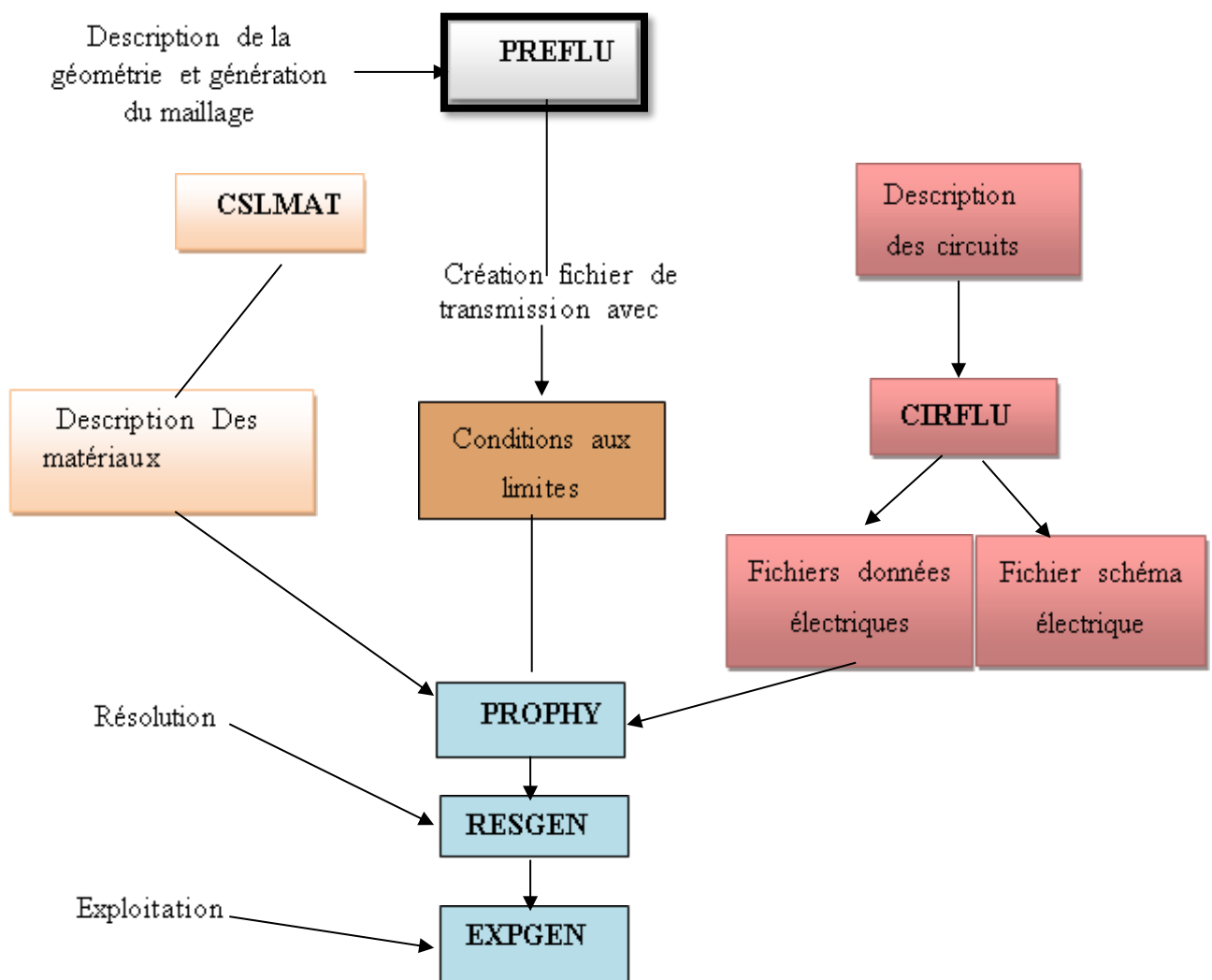


FIGURE 2-2. L'ENCHAÎNEMENT DES PROGRAMMES DE FLUX 2D.

### 2.4 Construction du modèle de la machine asynchrone :

On utilisera le logiciel flux sous sa forme 2D bien que l'inclinaison des encoches ainsi que les effets d'extrémités nécessiteraient pour une étude précise une présentation 3D. Les raisons de ce choix sont simples :

- Le temps de simulation est bien plus long encore en 3D qu'en 2D.
- L'influence de l'inclinaison des encoches n'est pas le but principal de notre étude.
- Les effets d'extrémités sont modélisés par des inductances et résistances calculées de façon analytique.

Les autres hypothèses qu'on a considéré dans le développement de notre modèle sont :

- L'hystérésis et les pertes fer sont négligées. L'alimentation est purement sinusoïdale.

## CHAPITRE 02 : Modélisation de la MADA par la méthode des éléments finis

---

- L'air autour de la machine et l'arbre ne sont pas modélisés pour cela la condition de *Dirichlet* ( $A=0$ ) est appliquée sur les nœuds extérieurs du stator et celles intérieurs du rotor, ce qui force les lignes de flux à être tangentes à ces deux surfaces.

### 2.5 Conclusion :

Dans ce deuxième chapitre, nous avons présenté un modèle numérique de la machine asynchrone double alimentation. En suite, on a cité les modèles mathématiques des équations de Maxwell, basé sur la méthode des éléments finis, sous l'environnement de logiciel Flux 2D.

**CHAPITRE03 :  
Simulation de la MADA par la méthode  
des éléments finis**

### 3.1 INTRODUCTION :

Nous présentons dans ce chapitre les résultats de simulation d'une machine asynchrone (MADA) dans le cas où la machine a l'état sain puis le cas de la présence de défaut, principalement déséquilibre de tension. Les simulations sont réalisées à partir d'un Logiciel flux2d dans son origine à l'étude des machines électriques dans le cas général où la méthode des éléments finis est adoptée pour résoudre les problèmes électromagnétique et mécanique régis par des équations aux dérivées partielles caractéristiques aux phénomènes physiques à traiter dans certains cas de nos simulations. L'effet d'encoche et de la saturation magnétique des parties ferromagnétiques de la machine sont pris en compte. Cette étude a pour but de vérifier l'impact de localisation des défauts de la MADA et faire la diagnostique de la machine par la technique d'analyse spectrale des courants.

### 3.2 Les propriétés physiques et régions :

Le problème étant défini par une application magnétique de 2D en magnéto transitoire (pas à pas dans le temps), auquel, le circuit électrique et les matériaux créés sont importés. Les valeurs des résistances, des inductances, et des tensions d'alimentation, sont Définies aussi ici. La prise en considération de mouvement (soit rotation ou translation) nécessite l'existence des ensembles mécaniques, ces derniers sont de trois types :

- Fixé : définie les parties fixes du modèle.
- En mouvement : définie les parties du modèle qui sont en mouvement.
- Compressible : définie les régions entre les parties fixes et celles en mouvement.

Dans notre modèle les trois types existent, le stator présente la partie fixe, le rotor est en mouvement (rotation suivant un axe parallèle à Oz) et l'entrefer est compressible.

Le couplage entre la géométrie du modèle et le circuit d'alimentation est effectuer par la création des régions surfaciques, chacune de ces régions est défini par son nom, son type, matériel, l'élément électrique correspondent dans le circuit, le sens du courant et l'ensemble mécanique. Puis ces régions sont associées aux surfaces de la géométrie par la commande (**assign régions to faces**).

La rotation est réalisée par la considération d'une bande de mouvement. A chaque instant le rotor est déplacé par un certain angle. La seule partie de la géométrie qui sera remaillé est la

bande de mouvement qui couple les éléments du rotor avec ceux de stator. Dans notre cas la bande de mouvement est constituée par la région de l'entrefer.

### 3.3 Aspect mécanique de la machine a induction

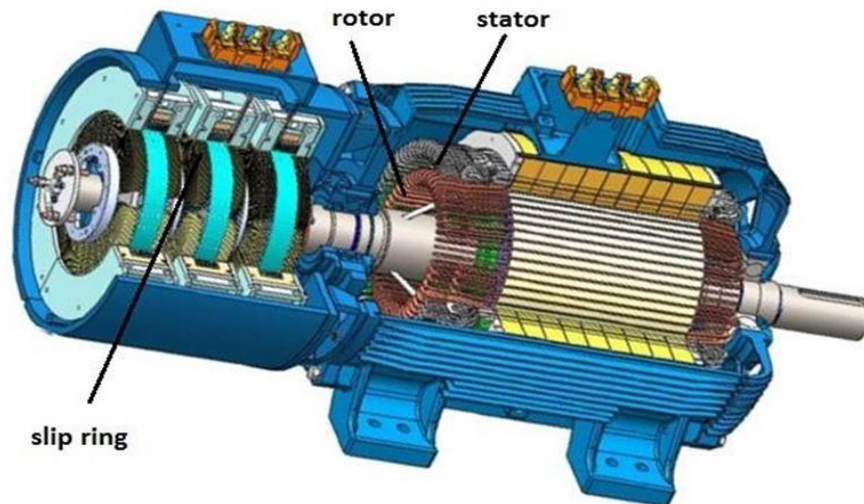


FIGURE 3-1.COUPPE D'UN GENERATEUR A INDUCTION A ROTOR BOBINE [36].

Les paramètre	Valeur
Puissance	55 KW
Fréquence	50 Hz
Tension nominale	220/380 V
Vitesse nominale	1500 tr/min
Nombre de pair de pôles	2
Nombres d'encoches statorique	60
Nombres d'encoches rotorique	48

TABLEAU 3-1 : LES PARAMETRE DE LA MACHINE

### 3.4 LA GEOMETRIE DE LA MACHINE ETUDIEE ET SES DIMENSIONS :

#### 3.4.1 Laminage de stator

Le stator est la partie fixe d'une machine à induction qui est utilisé pour réaliser l'alternance flux. La figure 3.2 présente la taille de la structure de stator et de la fente, où est réalisé le noyau de stator d'acier laminé pour réduire le courant de Foucault. M600-50A acier au silicium est sélectionné pour la construction et les propriétés de ce matériau stratifié ne changera pas après l'enroulement optimisation. Ces structures sont réalisées par estampage des tôles de 0,5 mm d'épaisseur de façon à construire un noyau de stator, qui est ensuite logé dans un châssis de stator. Il y a un total de 60 emplacements sur la périphérie de la tôle de stator dans lequel les enroulements de stator triphasé seront placés.



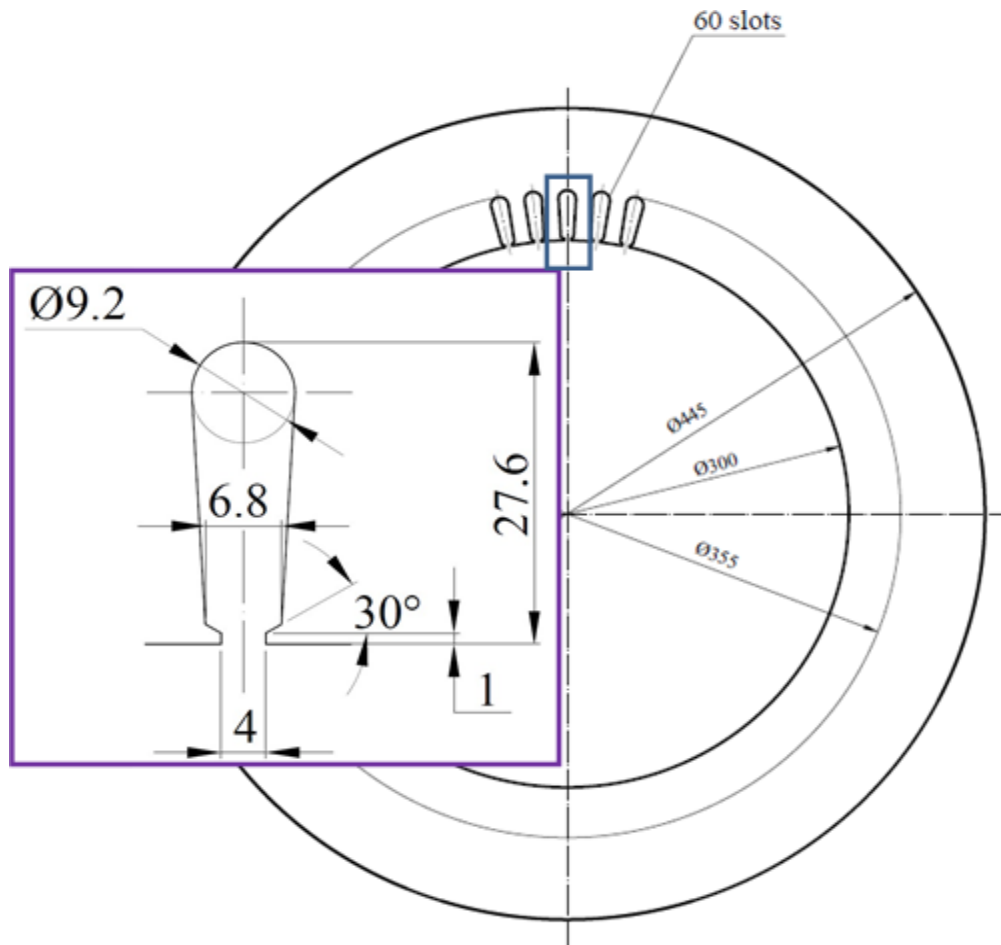


FIGURE 3-2. Structure de la fente de stator

La zone de fente et le facteur de remplissage sont très importants pour la performance de la machine. Le remplissage de la fente le facteur est égal au rapport de la surface conductrice sur la zone de fente totale, et donc si un remplissage de fente le facteur est de 50% signifie que la moitié de la zone d'emplacement est occupé par un matériau conducteur tel que pur cuivre ou d'aluminium tandis que l'autre 50% est représenté par l'isolement du conducteur, la fente l'isolation, et les écarts inévitables entre les conducteurs et les côtés de la fente. Par conséquent, la sélection de l'isolant autour des conducteurs a un effet sur le facteur de remplissage de la fente. Selon la forme de la fente de stator, la zone de la fente est calculée à environ 193 mm<sup>2</sup>. Le détail la conception d'enroulement et le facteur de remplissage de la fente sont introduits plus loin dans la section 3.4.2.

### 3.4.2 Laminage de rotor

Le rotor est enroulé pour le même nombre de pôles que le stator, mais il a moins de fentes et moins tours par phase, avec un plus grand conducteur surface en coupe transversale (CSA), comme le montre la figure 3.3.

Le matériau de stratification est la même que pour le laminage de stator, qui est M600-50A silicium acier. Le rotor se compose de 48 emplacements et le rotor à trois phases d'enroulement est placé à l'intérieur de ces fentes, tandis que les trois bornes d'extrémité sont reliées entre elles pour former une connexion en étoile. En outre, la zone de fente de rotor est d'environ 223 mm<sup>2</sup>.

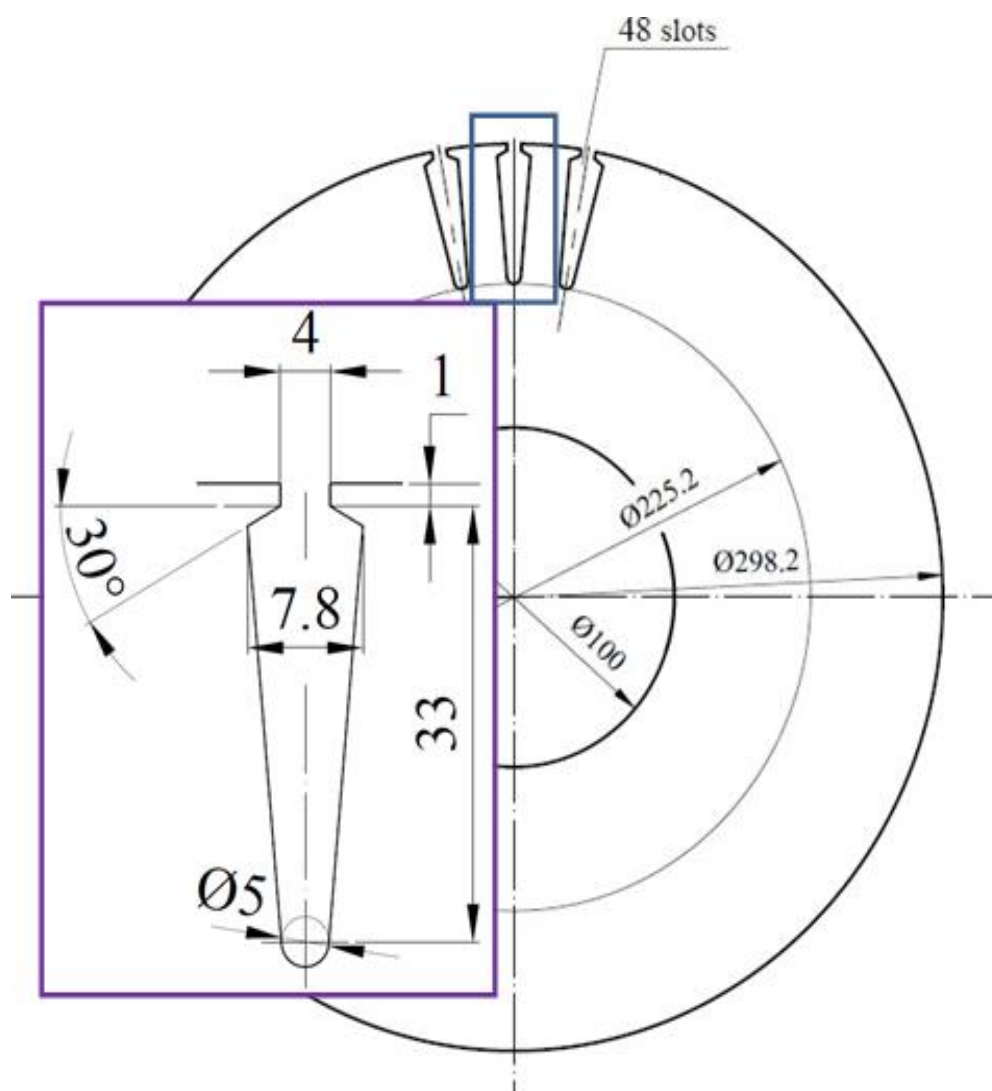


FIGURE 3-3. Structure de fente de rotor

### 3.4.3 Matériaux magnétiques

Caractéristique magnétique de M600-50A acier au silicium utilise pour stator et le rotor

## Chapier 03 : simulation de la MADA par la méthode des éléments

Pour ce qui est des propriétés magnétiques des matériaux ferreux, on prendra en compte la non-linéarité des caractéristiques B(H) (Tableau 3.1).

Valeur de champ (A.M-1)	Valeur de l'induction (T)	Valeur de champ (A.M-1)	Valeur de l'induction (T)
0	0	3327,748075	1,659493778
30,33862716	0,530274754	4190,02372	1,686641724
57,83300803	0,778706499	5267,868278	1,717876154
115,6660161	1,05059582	6615,173974	1,754777177
174,9211472	1,192058965	8299,306095	1,799201495
248,9900612	1,29379488	10404,47125	1,849345184
341,5762037	1,36935606	13035,92768	1,900897458
457,3088818	1,427041419	16325,24823	1,952406527
601,9747294	1,472253882	20436,89892	2,002310138
782,8070389	1,508701968	25576,46227	2,049056505
1008,847426	1,539060336	32000,91647	2,091211795
1291,397909	1,565357705	40031,48421	2,127530289
1644,586014	1,589219385	50069,6939	2,156974804
2086,071145	1,612029196	62617,456	2,178687416
2637,927558	1,63504581	68879,2016	2,186556157

TABLEAU 3-2 : VALEUR DE CARACTERISTIQUE MATERIAUX MAGNETIQUES

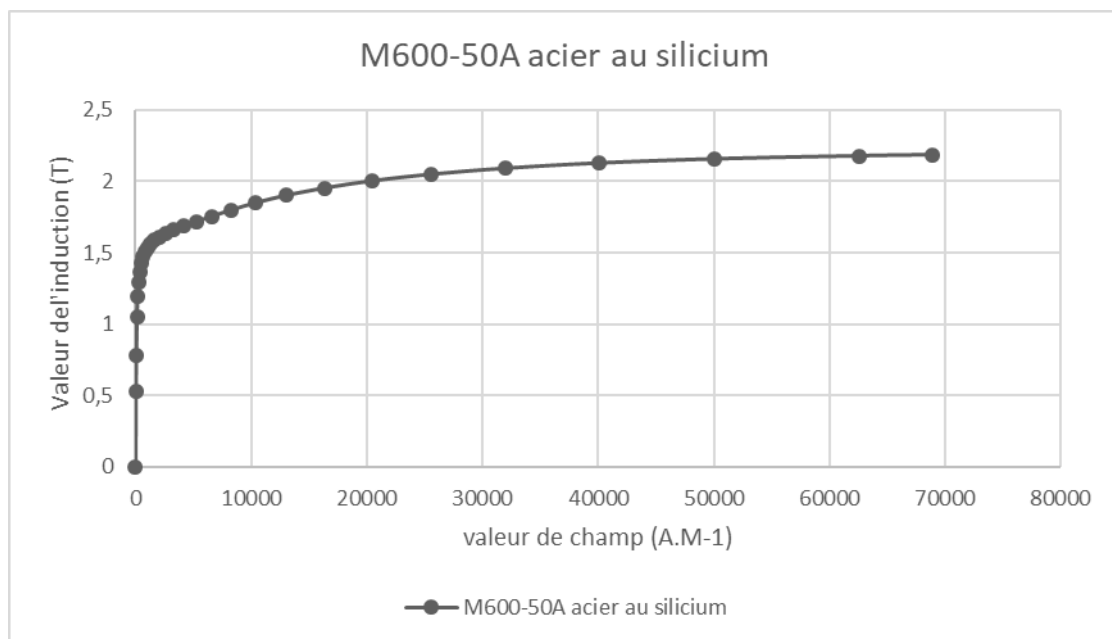


FIGURE 3-4. CARACTERISTIQUE MATERIAUX MAGNETIQUES

### 3.5 Procédure de construction du modèle par FLUX2D

Pratiquement, il suffit pour une machine saine de considérer un seul pôle grâce à la symétrie électrique et magnétique de la machine par rapport à son axe de rotation, mais ce n'est pas le cas pour une machine avec défaut où elle perd sa symétrie. Il faut donc réaliser la géométrie complète de la machine pour étudier son comportement avec défaut.

Pour simplifier la méthode de construction, on commence par faire entrer des paramètres et des systèmes de coordonnées pour le modèle puis schématiser la première encoche statorique et la première barre rotorique. Le reste de la géométrie et du maillage est créé par propagation.

Les paramètres à entrer représentent les dimensions des différentes parties de la machine, mais sont indépendants d'aucune unité de mesure. L'intérêt de ces paramètres est qu'ils simplifient l'entrée du problème et les modifications dans la géométrie par définition des coordonnées des points en fonction de ces paramètres, par exemple, on définit le diamètre intérieur de stator comme (DIS) et si on veut le changer il suffit de changer son paramètre, Flux2D vas automatiquement mettre à jour les points et les lignes correspondant sa ce paramètre et le maillage. Sans ce paramètre il faut redéfinir les coordonnées de chaque point et chaque ligne cités à cette distance ainsi que le maillage.

Lorsque on entre les points de l'encoche statorique et de celle rotorique et relie entre eux par des lignes et des arcs, les surfaces des régions sont automatiquement construits par ces lignes. Puis on construit les deux lignes intérieure et extérieure du rotor et celle extérieure de stator.

#### 3.5.1 Génération du maillage :

Les éléments du découpage sont générés automatiquement par un générateur de maillage dans le module Preflux, mais la size du maillage peut être contrôlé par création des points et des lignes du maillage puis l'association de ces derniers aux points de la géométrie. Preflux donne l'avantage de propagation des surfaces et leur maillage au même temps.

Pour compléter la géométrie facilement on ajoute des transformations qui doublent rapidement les surfaces et les lignes : pour le rotor, la transformation est une rotation autour d'un point, définie par les coordonnées de ce point et l'angle de rotation. Dans notre cas le point est o (0,0), l'angle égal à  $360/48$ . Pour le stator on définit une transformation du même type avec un angle égale à  $360/60$ . On applique la première à la surface qui représente la

surface de l'encoche rotorique 48 fois et la deuxième à la surface de l'encoche statorique 60 fois avec le choix de commande **Add Faces** and **associated Linked Mesh Generator** pour doubler les surfaces avec la prise en compte de leur maillage. Il reste le diamètre intérieur de stator, pour le compléter on relie entre deux encoches par un arc puis double cet arc 60 fois en appliquant la même transformation de l'encoche statorique. Finalement on choisit la commande **Build Faces** pour créer le reste des surfaces. La figure ci-dessous présente la géométrie avec les points du maillage.

### 3.5.2 Conception d'enroulement

La configuration d'enroulement influe sur le poids de la machine, l'appauvrissement de la perte, harmonique entrefer la distorsion et la densité de courant. Il existe deux types de bobinage pour une machine électrique : distribué et concentré enroulement.

Les machines conçues avec enroulement distribué ont tendance à présenter moins d'harmoniques ou de bruit dans la forme d'onde et moins la réaction d'induit à une comparaison concentré d'enroulement. Cependant, la perte de cuivre et le poids de la machine augmentent lorsque distribué enroulement est utilisé [52, 53]. En raison de la structure du MADA, son enroulement est composé de stator et de rotor d'enroulement. Enroulement triphasé peuvent être classés en tant que couche unique, double couche, et l'enroulement mixte. Dans l'enroulement à une seule couche, chaque extrémité d'une seule bobine occupe une fente complète et il existe quatre types de ce genre de liquidation :

- concentré enroulement
- enroulement imbriqué
- chaîne d'enroulement
- traverser l'enroulement

Lorsque les extrémités de deux bobines occupent une fente de manière égale, ce qu'on appelle une construction à double couche, qui peut être encore séparé en :

- double enroulement tour de couche
- double enroulement onde de couche

La double couche d'enroulement présente quelques avantages sur une seule couche d'enroulement. Il a un plus propre arrangement parce que toutes les bobines sont de la même taille, et il est plus souple car la durée de bobine peut varier facilement [54]. Bien que cette conception comporte un certain risque inhérent d'isolement entre les bobines à l'intérieur

d'une fente, ceci est compensé par d'autres avantages tels que de meilleures performances et d'économie en matériel. Ainsi, la double couche d'enroulement est la classe la plus largement adoptée d'enroulements, y compris dans cette mémoire. Pendant ce temps, serpentant tour peut fournir des chemins parallèles, et il est donc plus approprié pour la basse tension et haute des générateurs de courant. Pour cette raison, les genoux double couche d'enroulement est choisi dans les applications de générateurs électriques. La durée de l'enroulement d'une phase est définie comme étant la hauteur de la bobine, et lorsque l'angle de réglage de sensibilité est de 180 degrés électriques, ceci est une bobine pleine en pente qui est égale à pas polaire. Si l'angle électrique entre le point de départ et de fin de la bobine est inférieur à 180 degrés, la bobine est courte en pente. Par conséquent, la configuration des enroulements à double tour de couche peut être soit complètement lancé ou court en pente. En outre, le facteur décrivant l'angle entre deux bobines dans une phase est facteur de distribution Qualifié de [50]. Ainsi, on peut calculer le facteur d'enroulement en fonction de ces deux facteurs tels que dans les équations 3.1-3.3 ; où  $k_p$  est le facteur de pas,  $k_d$  est le facteur de distribution et  $k_w$  est le facteur d'enroulement,  $m$  le nombre harmonique,  $\theta$  l'angle de tangage,  $\delta$  l'angle de distribution et  $n$  là le nombre de spires par phase [50]:

$$k_{pm} = \cos\left(\frac{m\theta}{2}\right) \quad (3.1)$$

$$k_{dm} = \frac{\sin\left(\frac{m\theta}{2}\right)}{n \sin\left(\frac{m\theta}{2}\right)} \quad (3.2)$$

$$k_{wn} = k_{pm} \times k_{dm} \quad (3.3)$$

Avec :

$k_w$  : le facteur d'enroulement

$k_d$  : le facteur de distribution

$k_p$  : le facteur de pas

$\delta$  : l'angle de distribution

$n$  : le nombre de spires par phase

$m$  : le nombre harmonique

$\theta$  : l'angle de tangage

Dans cette conception, la bobine courte est sélectionnée tangage plutôt que la bobine pleine tangage., en raison d'une série de avantages. Par exemple, à court enroulement en

### Chapier 03 : simulation de la MADA par la méthode des éléments

---

penne réduit le compte du matériau de la bobine nécessite et la teneur harmonique de la densité de flux dans l'entrefer, en particulier les harmoniques d'ordre élevé. Il produit également une distribution de courant plus sinusoïdale liaison d'une bobine pleine tangage. Cependant,

Quelle que soit la configuration d'enroulement est sélectionné, certaines règles de base doivent être respectées pour trois Phase de construction d'enroulement pour générer un champ magnétique tournant :

- le numéro d'emplacement de l'enroulement par phase doit être le même
- l'enroulement triphasé doit être espacée d'un angle électrique de 120 ° les uns des autres
- l'enroulement triphasé adopte une marge de phase 60 °, qui est divisé en six équilibré

La phase se propage dans le champ magnétique

Afin d'obtenir de meilleures performances électriques, le pas de bobine doit être conçu de manière à être aussi près que possible du pas polaire, comme représenté dans l'équation 3.4.

$$\tau_w \approx \tau_p \equiv \frac{Z}{2p} \quad (3.4)$$

où

$\tau_w$  : pas de bobinage .

$\tau_p$  : est pas polaire .

$Z$  : est le nombre de fentes .

$P$  : est le nombre de paires de pôles.

Pour ces raisons, le pas de bobinage du stator et du rotor ont été choisis comme 14/1 et 12/1 par le fabricant de la machine dans la conception de MADA d'origine. Le stator 60 comporte des fentes et le rotor 48 a fentes avec une conception à quatre pôles, de sorte que les emplacements polaires sont respectivement de 15 et 12. Chaque bobine a 16 tours avec un CSA du conducteur torsadé de 4,29 mm<sup>2</sup> fixée pour l'enroulement de stator, et 14 tourne avec un CSA de 6,95 mm<sup>2</sup> pour l'enroulement de rotor. Par conséquent, le facteur de remplissage du stator et le rotor sont environ 35,52% et 37,35%, respectivement. Le matériau de la bobine est en cuivre 100% IACS, avec une résistivité de 1.7843 × 10<sup>-8</sup> Qm à 20 °C.

En raison de la puissance de cette machine à la fois le stator et le rotor d'enroulement par phase sont relié à deux voies parallèles pour attirer élevés courant dans l'enroulement, comme représenté sur la chiffres 3.5 et 3.6. Les figures 3.7 et 3.8montrent des détails de la méthode de connexion à trois phases enroulement pour le stator et le rotor. Une connexion

### Chapier 03 : simulation de la MADA par la méthode des éléments

en triangle pour l'enroulement de stator et d'une connexion en étoile pour l'enroulement du rotor ont été sélectionnés. Tableau 3.2 et le tableau 3.3 présentent les configurations d'enroulement.

Paramètre	Valeur
Enroulement	2 séries parallèles de cinq spires adjacentes par phase avec 14.01 tangage bobine, connexion delta
Type de physique de l'enroulement	Couche double
Matériel d'enroulement	Cuivre 100% IACS
Nombre de tours	16 par fente
Zone transversale	4,29 mm <sup>2</sup>
Résistance phass	0.1624 ohms
Facteur de remplissage	35,52%

Tableau 3.2 configuration d'enroulement de stator

Paramètre	Valeur
Enroulement	2 séries parallèles de quatre bobines adjacentes par phase avec 1-12 terrain bobine, connexion en étoile
Type de physique de l'enroulement	Couche double
Matériel d'enroulement	Cuivre 100% IACS
Nombre de tours	12 par fente
Zone transversale	6,95 mm <sup>2</sup>
Résistance phase	0,056 ohms
Facteur de remplissage	37,35%

Tableau 3.3 configuration d'enroulement du rotor



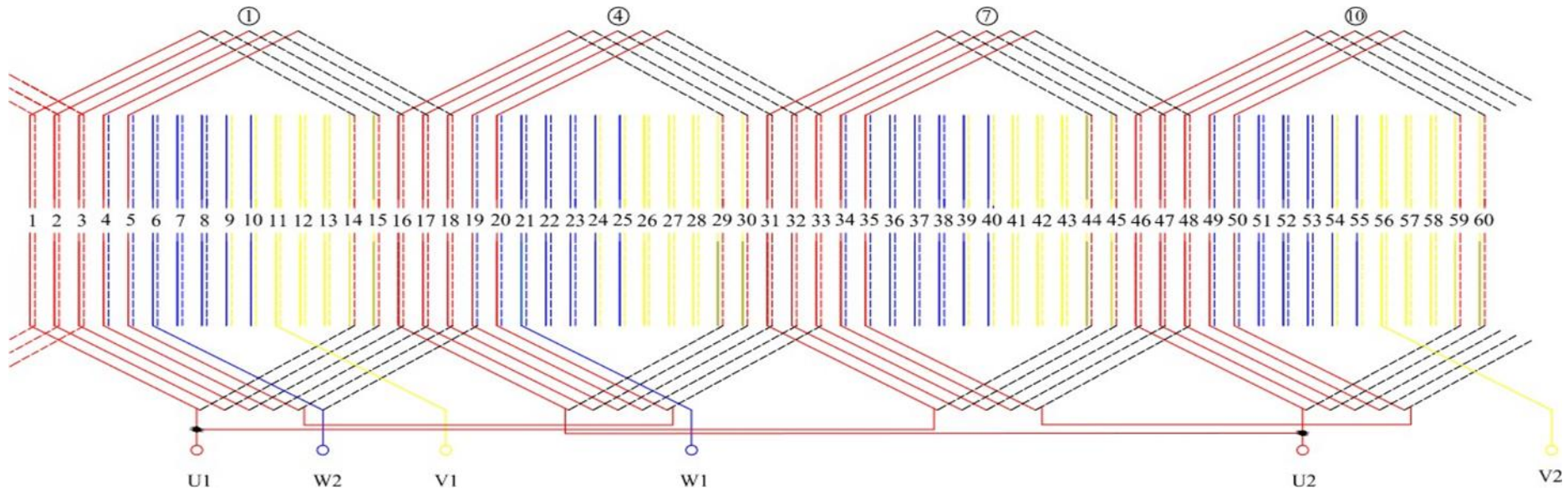


FIGURE 3-5. TRIPHASES 4 POLES 60 SLOTS A SIMPLE CONFIGURATION D'ENROULEMENT DE LA COUCHE AVEC DEUX ENSEMBLES PARALLELES (PAS DE BOBINAGE 14/01).

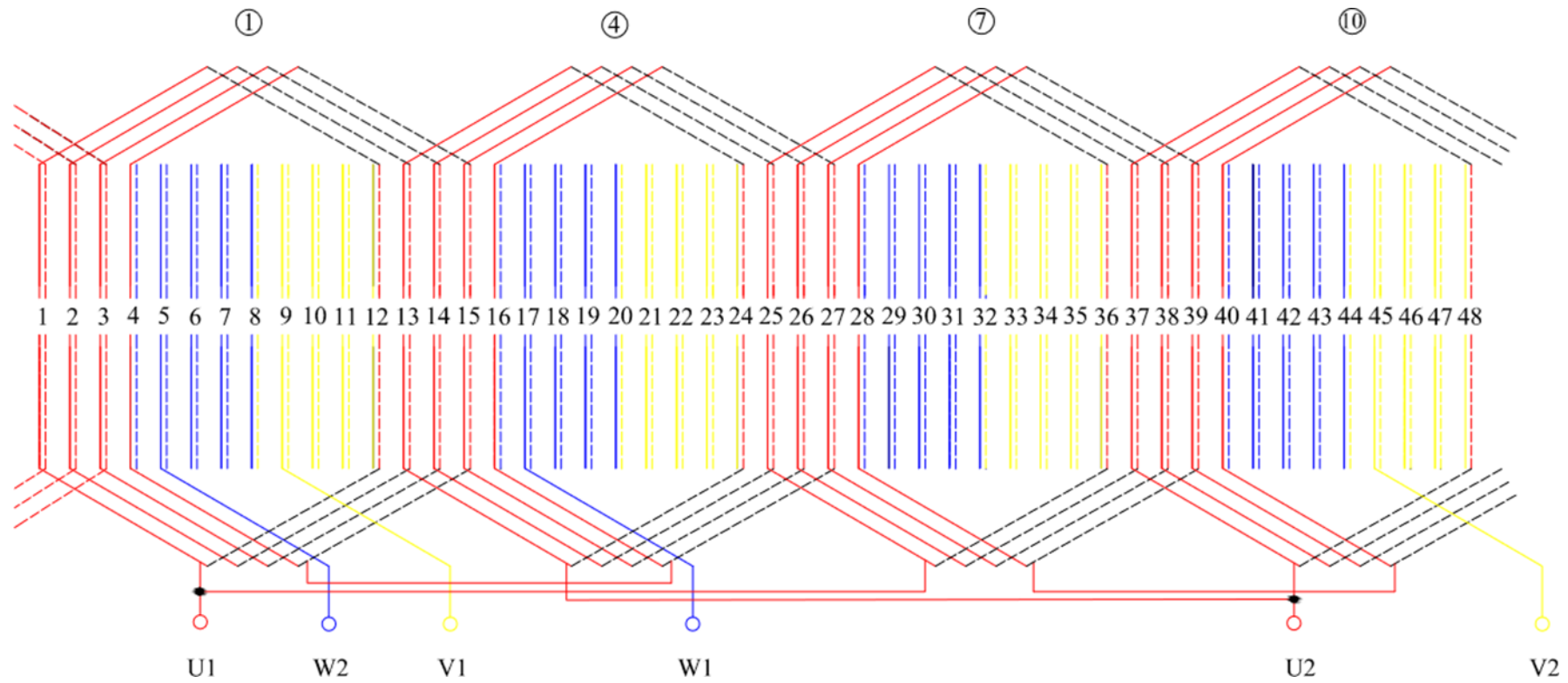


FIGURE 3-6. TRIPHASES 4 POLES 48 SLOTS A SIMPLE CONFIGURATION D'ENROULEMENT DE LA COUCHE AVEC DEUX ENSEMBLES PARALLELES (PAS D'ENROULEMENT DE 1 A 12).

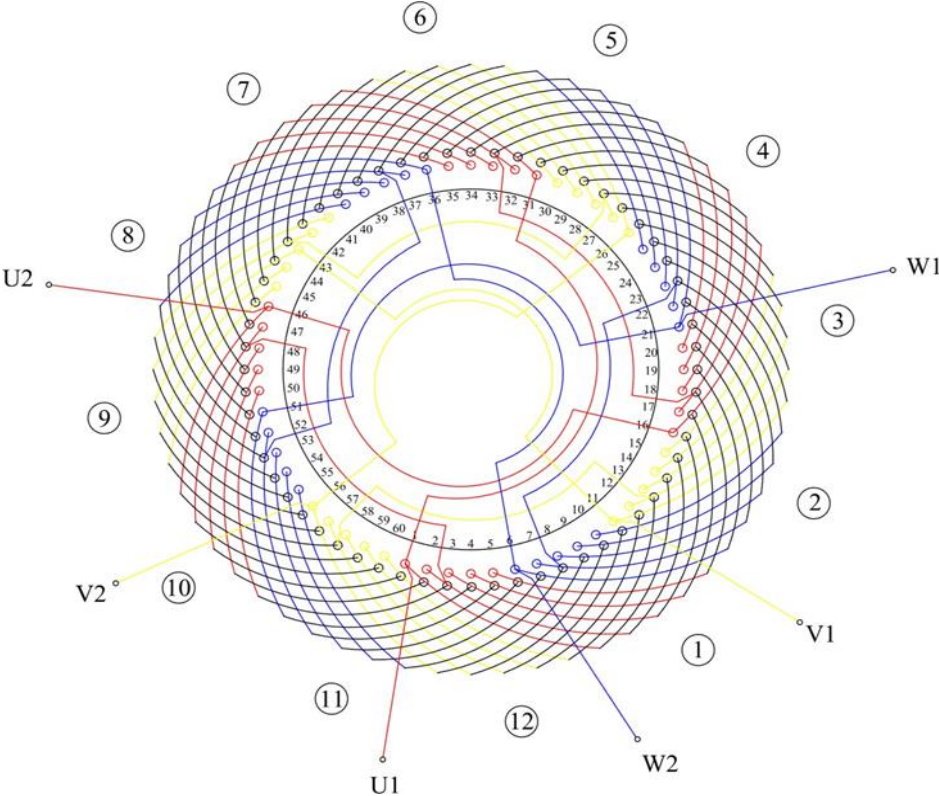


FIGURE 3-7.CONNEXION ENROULEMENT A TROIS PHASES DANS LE STATOR CONFIGURATION D'ENROULEMENT.

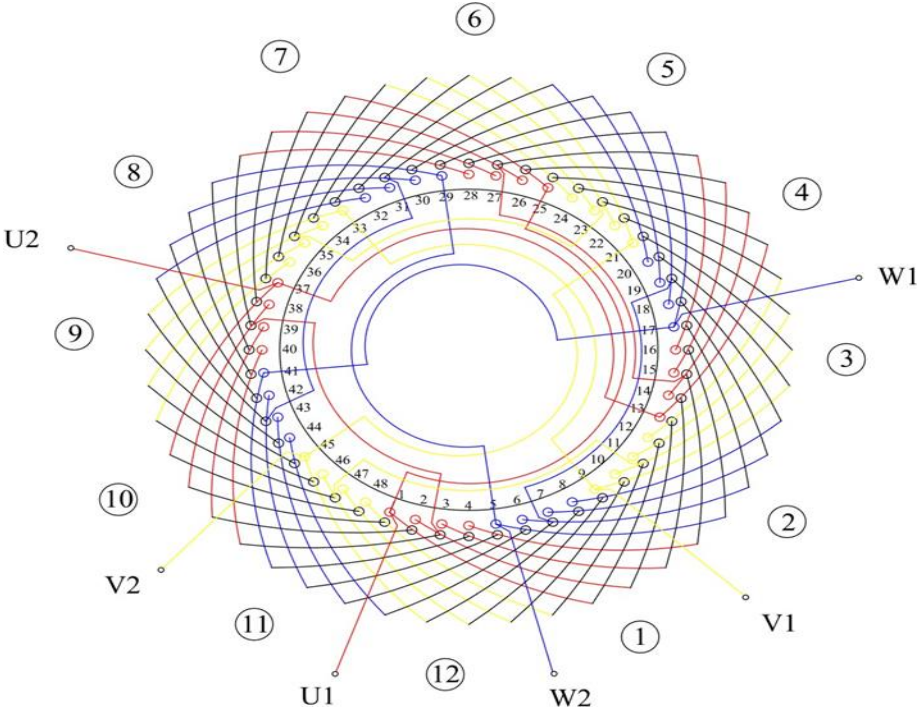


FIGURE 3-8.CONNEXION ENROULEMENT TRIPHASE A ROTOR DOUBLE CONFIGURATION D'ENROULEMENT.

### 3.6 Circuit électrique

Pour représenter fidèlement le moteur, il faut tenir compte des effets d'extrémités (inductance, résistance de tête de bobine). Le circuit représente :

- Les sources de tension d'alimentation (V1 V2 V3)
- Les bobinages statoriques (B1 B2 B3 B4 B5 B6 B7.....jusqu'à B60)
- Les bobinages rotoriques (B61 B62 B63 B64 B65 B66 ..... Jusqu'à B108)
- Les Inductances de fuite (L1 L2 L3 L4 L5 L6)
- Résistances de chute de tension (R1 R2 R3 R4 R5 R6)

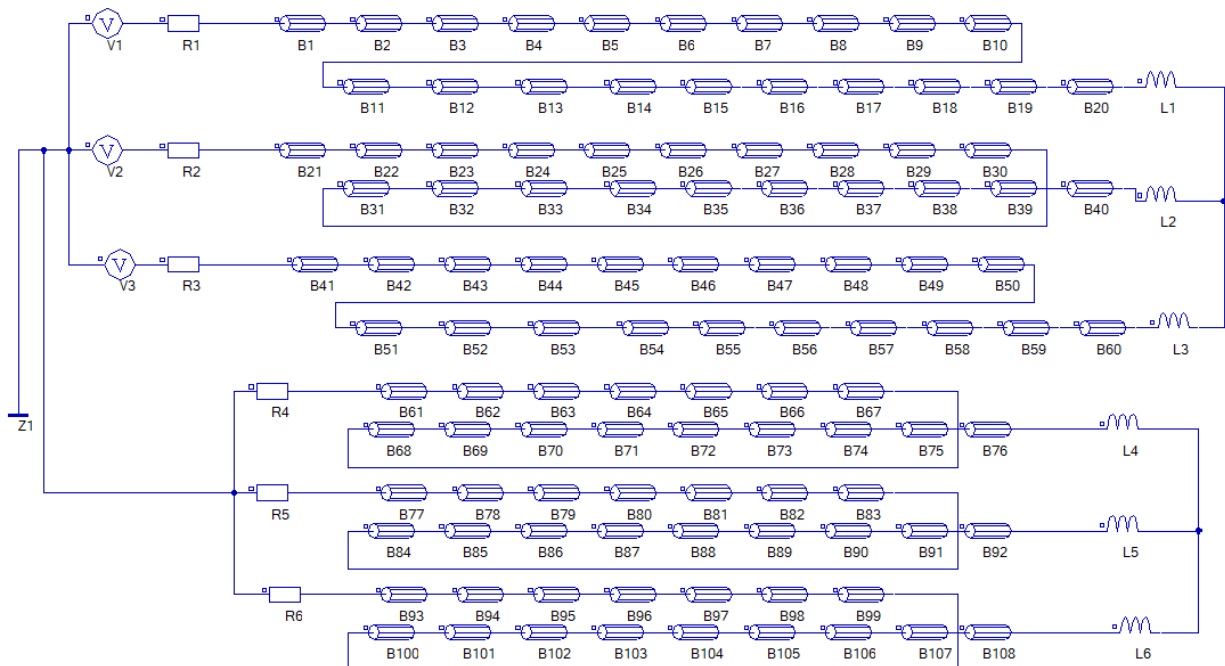
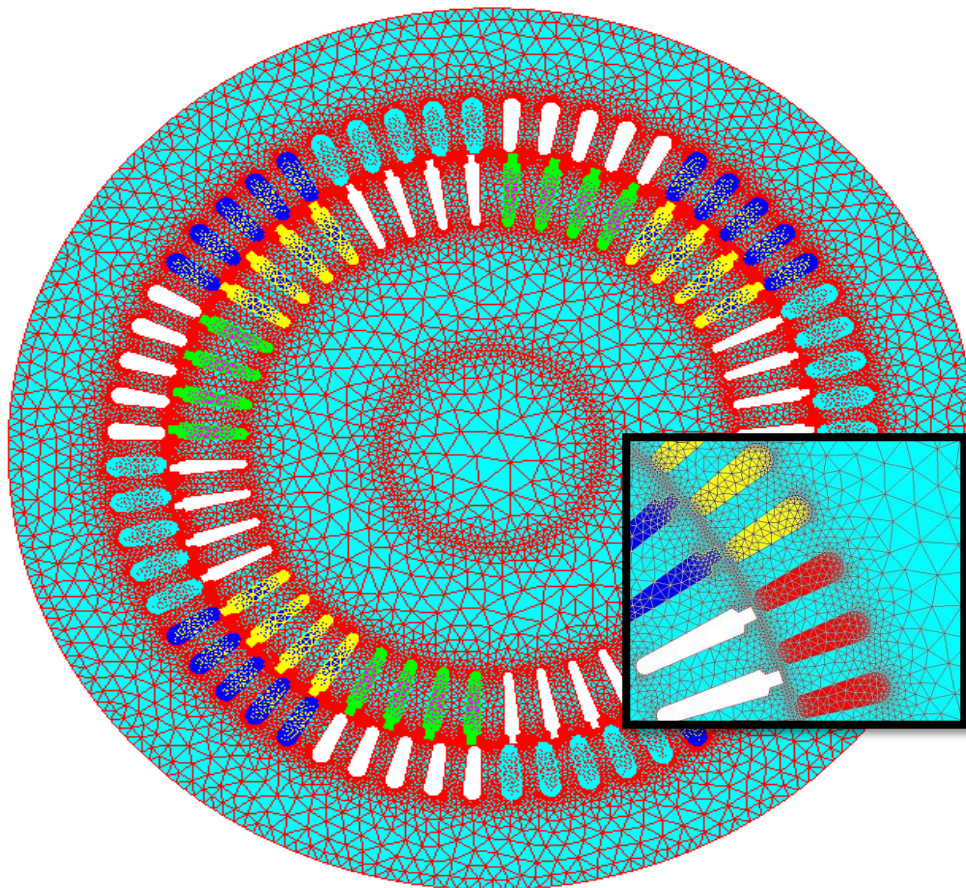


FIGURE 3-9. CIRCUIT COUPLE AVEC LE MODELE FE

#### 3.6.1 Détails du modèle

L'analyse du flux de la MADA est supposée être à deux dimensions, et la modélisation peut donc être entreprise à l'aide d'un programme FEM en deux dimensions. Le logiciel d'éléments finis commerciaux utilisé ici est flux 2d version (10.4) ( 12.31... ) . Comme décrit dans la section 3.4, à trois phases, à quatre pôles DFIG était simulé à l'aide de ce logiciel, et en raison de la configuration complexe d'enroulement de la machine un modèle complet est construit. Le modèle de base 2D avec la maille est représentée sur la figure 3.10





**FIGURE 3-10.**FEM MAILLAGE DE DF IG.

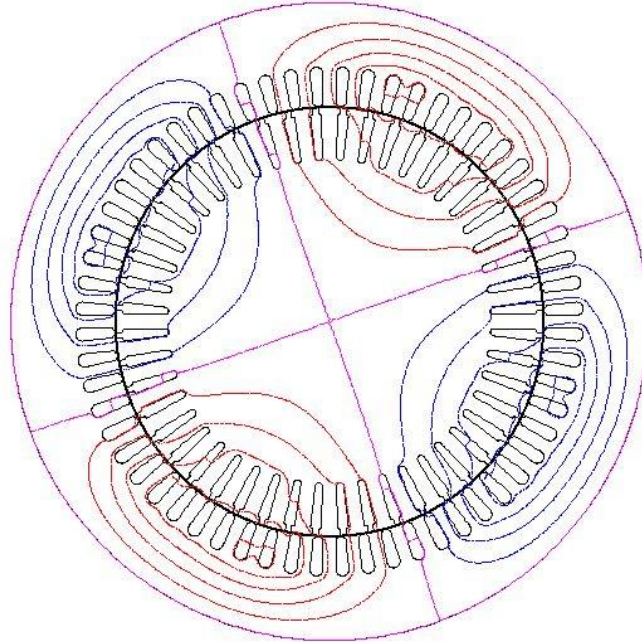
La taille des éléments de maillage du modèle varie, et la taille des mailles est l'une des plus importantes les aspects d'une solution d'éléments finis. En raison de l'unité de mesure de l'entrefer et conducteurs, la taille des mailles plus denses doivent être utilisés.

Afin d'assurer la précision de la simulation, l'air de délimitation de modèle a été divisé en quatre parties : les boîtiers d'air entourant le stator et rotor, et les entrefers statiques et rotatifs qui complètent les deux sections de l'entrefer du modèle.

Le maillage d'entrefer (l'air-gap) statique et rotatif a une taille d'élément maximum de 3,5 mm à précise permettre à la description de la vitesse de variation du champ magnétique dans l'entrefer. A côté de cela, la plus petite taille de maille de 1,6 mm a été choisi autour des conducteurs de stator et de rotor. Pendant ce temps, le modèle est entouré par une région d'arrière-plan de l'air afin de réduire l'influence de conditions aux limites artificielles.

Ceci est nécessaire dans l'exécution de l'analyse par éléments finis [53]. Le champ d'ondes électromagnétique est généré par les courants de stator qui existent dans l'entrefer et

traverse les dents du rotor pour embrasser les enroulements du rotor. Par conséquent, le motif de l'électromagnétique champ est équivalent et symétrique comme représenté sur la figure 3.11



**FIGURE 3-11.** COURBE DE FLUX DE CONTOUR DE MADA.

Pour atteindre l'objectif de l'analyse d'enroulement, la prédiction du comportement de la machine à l'aide analyse par éléments finis nécessite le modèle à fonctionner avec différentes tailles de bobine. Toutes les FE modèle solutions appliquées pour obtenir les résultats souhaités étaient 2D transitoire avec le mouvement

### 3.6.2 Circuit équivalent de la MADA

Pour analyser les performances de la MADA, le modèle numérique du circuit équivalent par phase est utilisé avec l'inclusion des pertes de magnétisation, comme montré sur la figure 3.13 La plus grande différence entre le DFIG et machines à induction classiques est dans le circuit de côté du rotor, où un la source de tension est ajoutée à injecter tension. L'application de la loi de tension de Kirchhoff au circuit [56] donne :

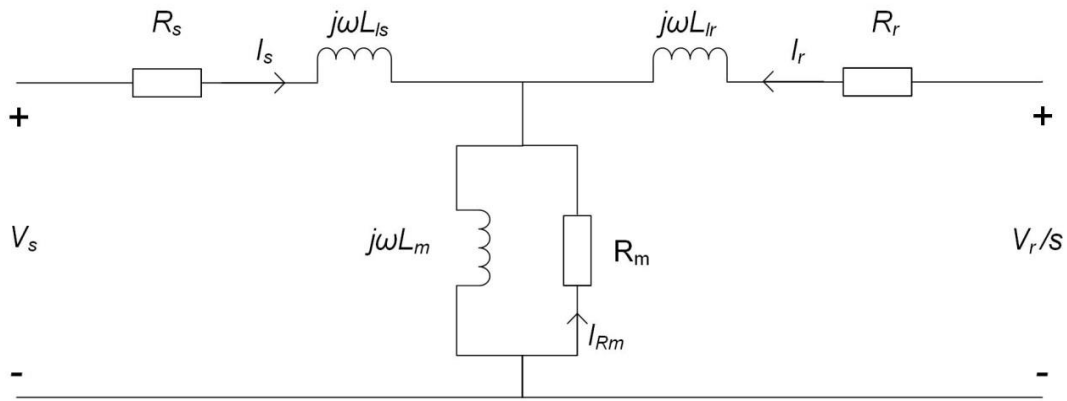


FIGURE 3-12.CIRCUIT EQUIVALENT DE LA MADA

$$V_s \equiv R_s I_s + j\omega L_{l_s} I_s + j\omega L_m (I_s + I_r + I_m) \quad (3.05)$$

$$\frac{V_r}{s} \equiv \frac{R_r I_r}{s} + j\omega L_{l_r} I_r + j\omega L_m (I_s + I_r + I_m) \quad (3.06)$$

$$0 \equiv R_m I_m + j\omega L_m (I_s + I_r + I_m) \quad (3.07)$$

Où  $V_s$  est la tension de stator,  $R_s$  est la résistance de stator,  $V_r$  est la tension de rotor,  $R_r$  est la résistance du rotor,  $s$  est le courant de stator,  $r$  est le courant de rotor,  $R_m$  est magnétisant résistance,  $L_{l_s}$  est l'inductance de fuite du stator,  $L_{l_r}$  est l'inductance de fuite du rotor,  $m$  est courant magnétisant de résistance, et  $L_m$  est le magnétisant inductance.

Le flux d'entrefer, le flux de stator et le flux du rotor sont définis comme dans les équations 3.08-3.10 :

$$\psi_m = L_m (I_s + I_r + I_m) \quad (3.08)$$

$$\psi_s = L_{l_r} I_r + L_m (I_s + I_r + I_m) = L_{l_r} I_r + \psi_m \quad (3.09)$$

$$\psi_r = L_{l_r} I_r + L_m (I_s + I_r + I_m) = L_{l_r} I_r + \psi_m \quad (3.10)$$

Par conséquent, les équations décrivant le circuit équivalent peuvent être reformulé comme suit :

$$V_s = R_s I_s + j\omega \psi_s \quad (3.11)$$

$$\frac{V_r}{s} = \frac{R_r}{s} I_r + j\omega \psi_r \quad (3.12)$$

$$V_s = R_m I_m + j\omega \psi_m \quad (3.13) \quad *$$

Les pertes résistives du générateur à induction sont :

$$P_{loss} = 3(R_s|I_s|^2 + R_r|I_r|^2 + R_m|I_m|^2) \quad (3.14)$$

Et il est alors possible d'exprimer le couple électromécanique,  $T_e$  comme dans l'équation 3.15

$$T_e = 3pI_m[\psi_m I_r^*] = 3pI_m[\psi_r I_r^*] \quad (3.15) [56]$$

### 3.6.3 Perte de conducteur électrique

Le matériau du conducteur électrique est choisi en cuivre 100% IACS à la FEM et de la résistivité électrique du conducteur est  $1,7241 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$  à  $20^\circ\text{C}$  et la valeur varie avec température visée à la figure 3.4. Section 3.6.2 introduit le complexe d'enroulement en page et de la conception de cette machine, où le pas de bobine de stator est 1-14 avec connexions en étoile les connexions et le pas de bobinage de rotor est de 1 à 12 avec connexions en étoile. Le stator et rotor adopte une liaison simple couche. A côté de cela, une température d'enroulement de  $20^\circ\text{C}$  est assumé. La résistance de l'enroulement de la machine d'origine est ensuite calculée comme dans les équations suivantes.

La résistance d'un fil de l'enroulement de stator est calculée comme suit :

$$R_1 = \rho_{20} \frac{L_{sl}}{A_{sl}} = 0.017241 \times \frac{0.48676}{4.29} = 0.00196 \Omega \quad (3.16)$$

En raison des deux voies dans la mise en série de l'enroulement de stator, la seule résistance de l'enroulement du stator voie d'enroulement est exprimée en tant que :

$$\begin{aligned} R'_1 &= R_1 \times \frac{\text{nombre de encouche statorique}}{\text{nombre de pahse}} \times \frac{\text{nombre de spir en stator}}{\text{nombre de route parallel connection}} \\ &= 0.00196 \times \frac{60}{3} \times \frac{16}{2} = 0.3136 \Omega \end{aligned} \quad (3.17)$$

Conséquent, la résistance de phase de l'enroulement du stator est calculée comme suit :

La résistance à un fil de l'enroulement du rotor est déterminée comme suit :



$$R_2 = \rho_{20} \frac{L_{rl}}{A_{rl}} = 0.017241 \times \frac{0.45233}{6.96} = 0.00112 \Omega \quad (3.18)$$

La conception du bobinage du rotor utilise également une structure à double couche,( main ou na utilisez la structure de simple couche de bobinage avec la même valeurs de résistance de conducteur bobine ) de sorte que le bobinage à une voie La résistance de l'enroulement du rotor est la suivante :

$$R'_2 = R_2 \times \frac{\text{nombre de encouche rotorique}}{\text{nombre de pahse}} \times \frac{\text{nombre de spair en rotor}}{\text{nombre de route parallel connection}}$$

$$= 0.00112 \times \frac{60}{3} \times \frac{12}{2} = 0.10752 \Omega \quad (3.19)$$

Avec :

$R_1$  : La résistance d'un fil de l'enroulement de stator

$R'_1$ : résistance de condictor bobine statorique

$R_2$ : La résistance d'un fil de l'enroulement de rotor

$R'_2$ :résistance de condictor bobine rotor

### 3.7 Simulation de la MADA à l'état sain :

Le modèle de la machine asynchrone à l'état sain a été simulé à vide sous une alimentation triphasée nominale et équilibrée dont les résultats sont présentés à la figure (3.14) pour un premier essai. Comme deuxième essai, le moteur démarre avec une charge de 10Nm, les résultats sont présentés à partir la figure (3.21).

#### 3.7.1 Tension d'alimentations

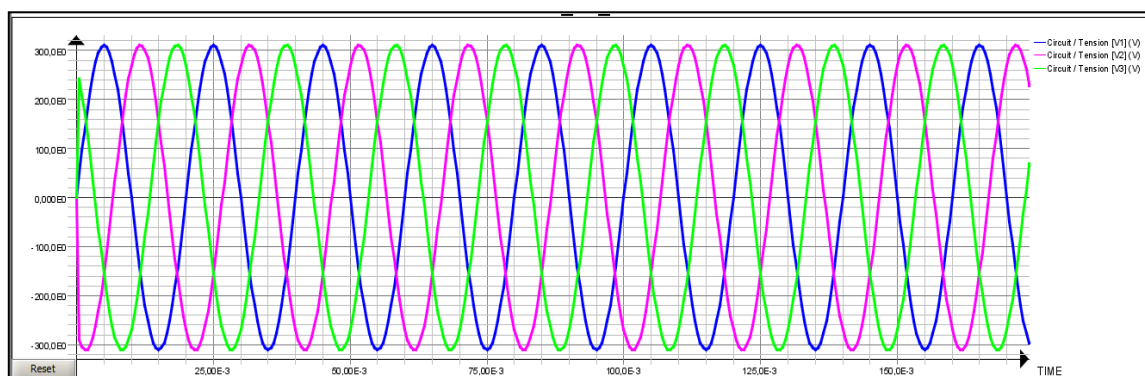


FIGURE 3-13.TENSION D'ENTREE EQUILIBRE

1.1.1 Résultat de simulation Fonctionnement à vide :

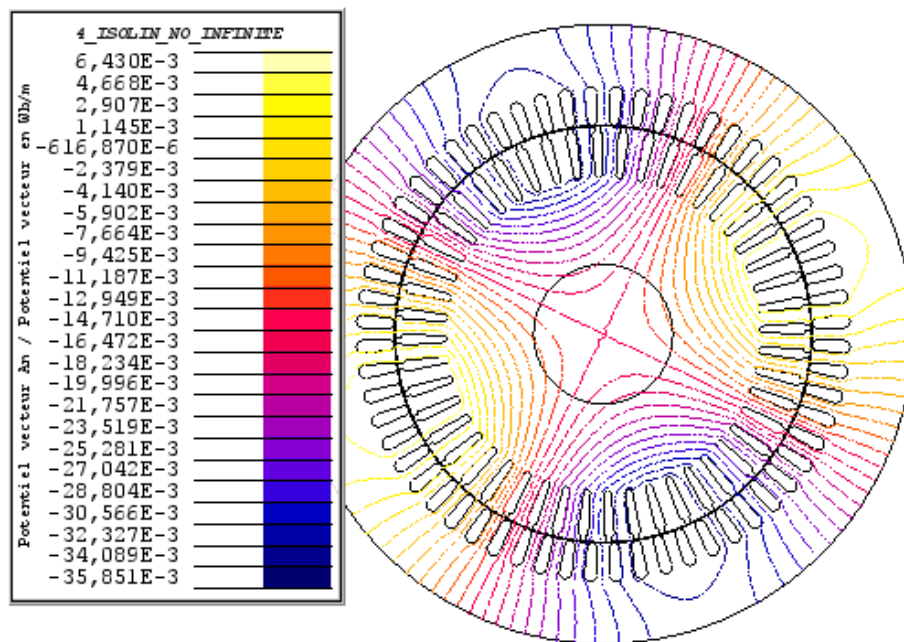


FIGURE 3-14.LA DISTRIBUTION DES LIGNES DU FLUX A VIDE EN REGIME PERMANENT

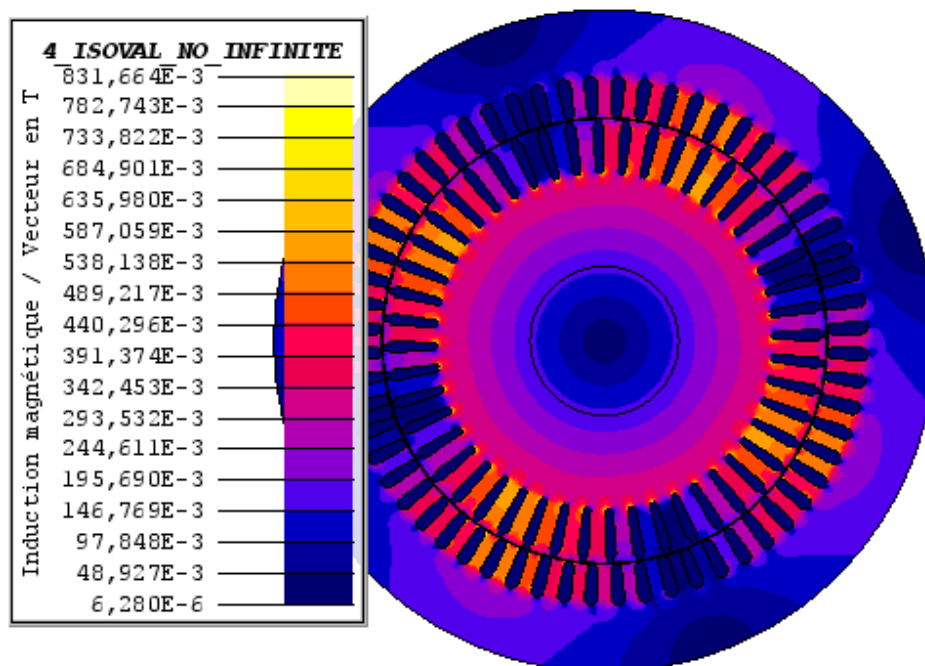


FIGURE 3-15.L'induction B à vide en régime permanent

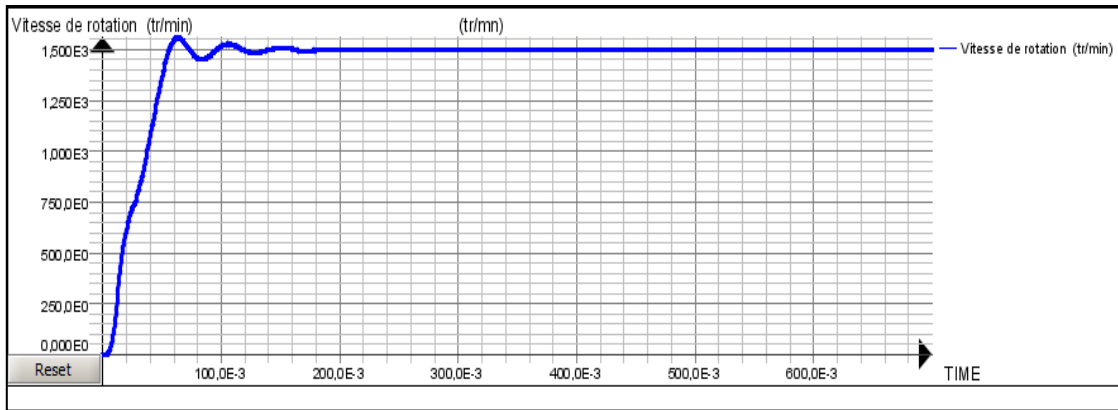


FIGURE 3-16.VITESSE DE ROTATION DE LA MACHINE A L'ETAT SAIN A VIDE.

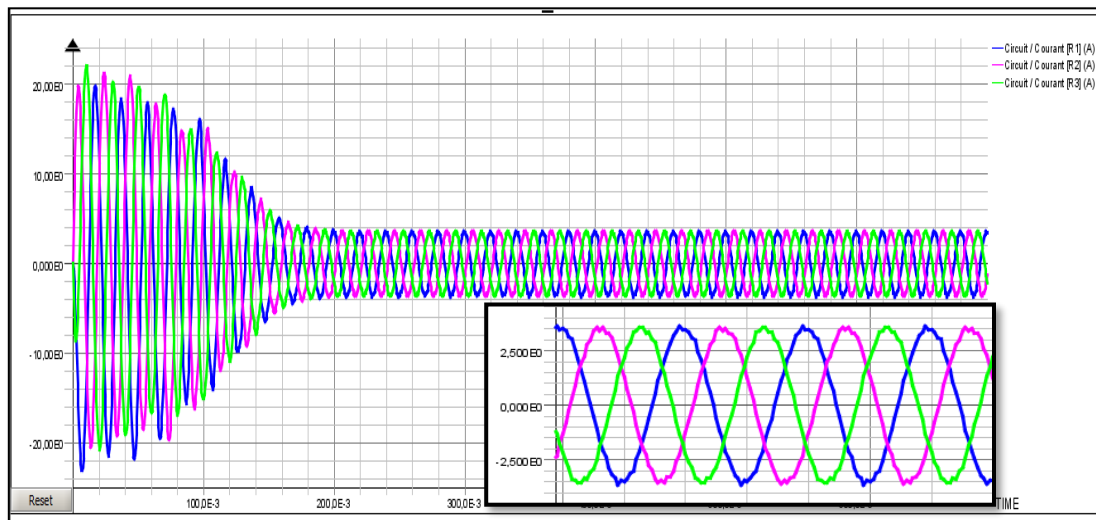


FIGURE 3-17.FORME D'ONDE DU COURANT STATORIQUE A VIDE A L'ETAT SAIN

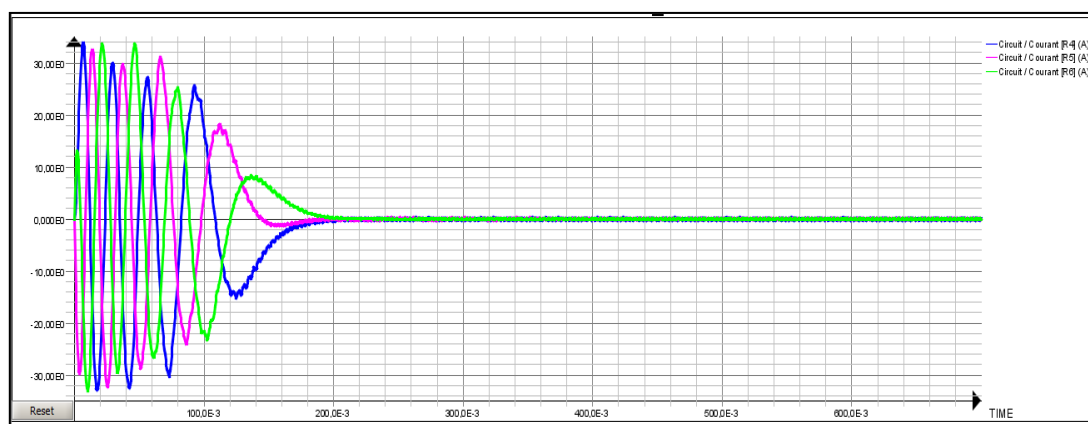


FIGURE 3-18.FORME D'ONDE DU COURANT ROTORIQUE E DE LA MACHINE A VIDE

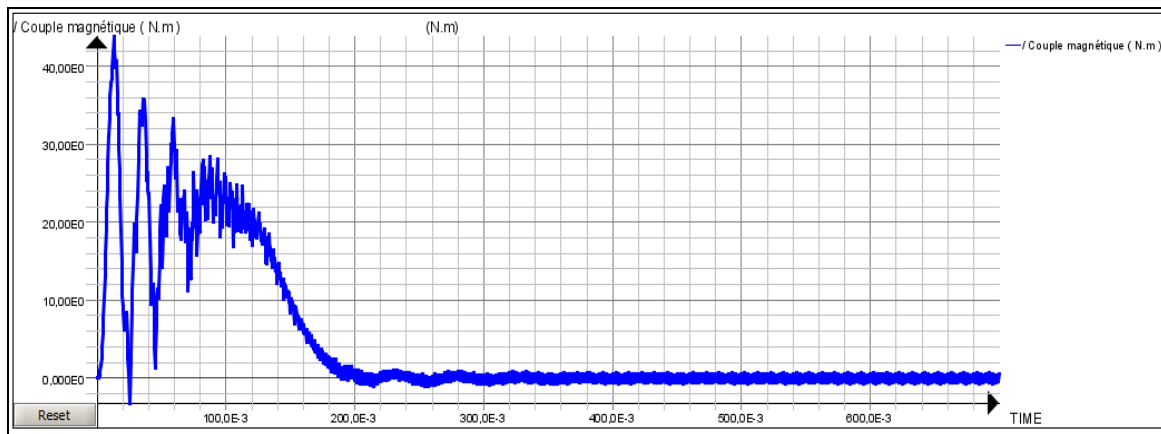


FIGURE 3-19. COUPLE ELECTROMAGNETIQUE DE LA MACHINE SAIN A VIDE.

### 3.7.2 Interprétations des résultats à vide :

On constate, d'après les courbes que la vitesse atteint des pics très importants (1550tr/min) au début puis se stabilise à la vitesse de synchronisme après une période transitoire de 60 ms (qui présente de très fortes oscillations).

On note aussi une valeur importante du couple au démarrage pendant une durée de 0.3s, à cause de l'échange d'énergie électromagnétique entre le stator et le rotor.

Après la disparition du régime transitoire, le couple ramène le rotor à la vitesse de synchronisme où il se stabilise au voisinage de zéro puisqu'il n'y a pas de charge et les frottements sont négligés au démarrage.

Au démarrage, les courants sont caractérisés par des pics très importants qui, après le régime transitoire, tendent vers leurs valeurs nominales 3,3A.

Ces pics s'expliquent par une faible f.c.é.m. liée à la faible valeur de la vitesse au démarrage (Proportionnalité f.c.é.m., vitesse de rotation).

### 3.7.3 Résultat de simulation Fonctionnement en charge :

Pour le fonctionnement en charge en régime sain en applique un couple résistant  $C_r=10$  N.m sur la machine on obtient donc les figures suivantes :

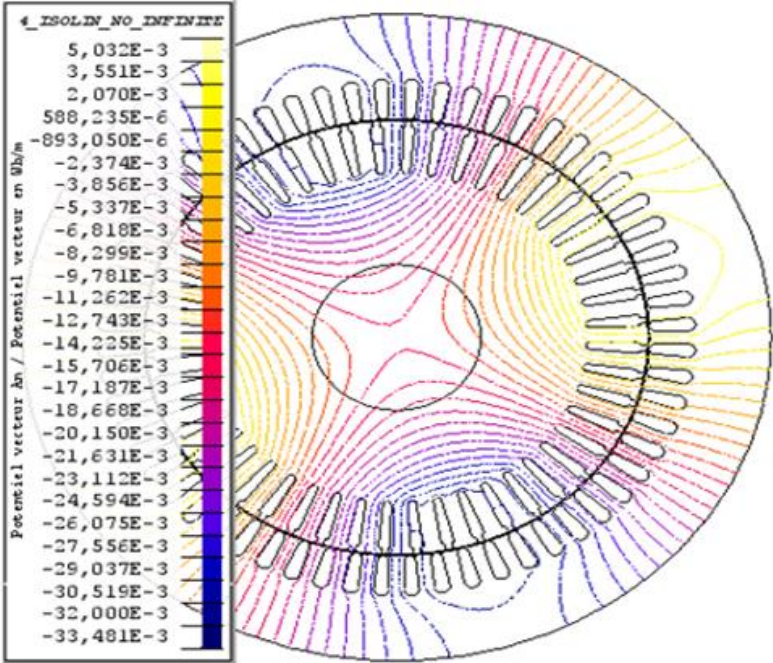


FIGURE 3-20.LA DISTRIBUTION DES LIGNES DU FLUX EN CHARGE DE 10 NM REGIME PERMANENT

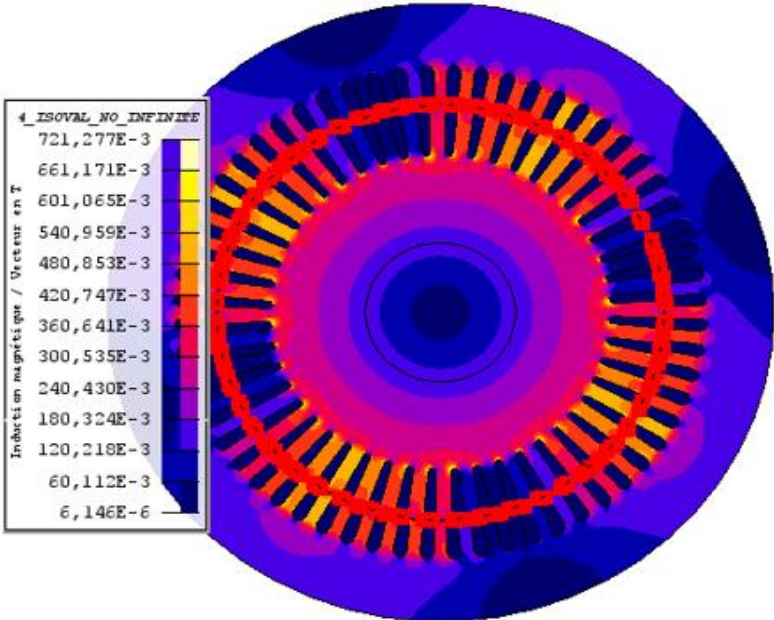


FIGURE 3-21.L'INDUCTION B EN CHARGE DE 10 NM REGIME PERMANENT

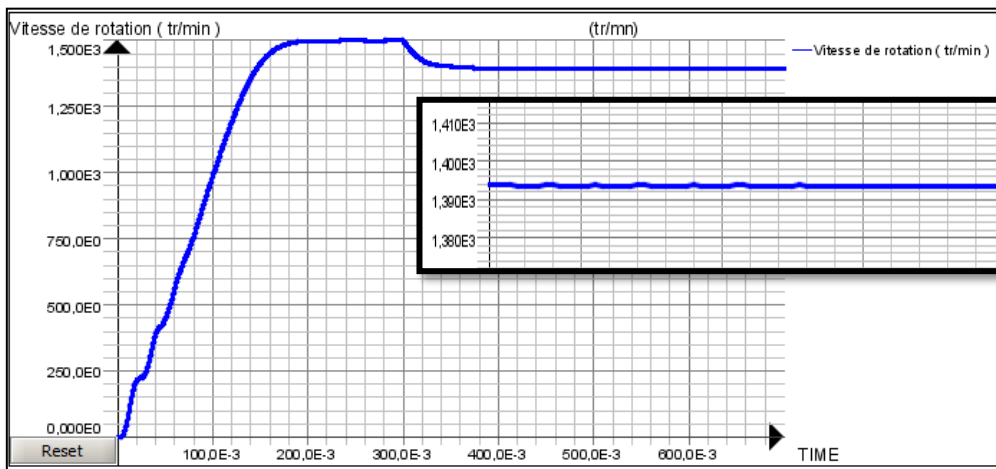


FIGURE 3-22.VITESSE DE ROTATION DE LA MACHINE A L'ETAT SAIN EN CHARGE DE 10 NM

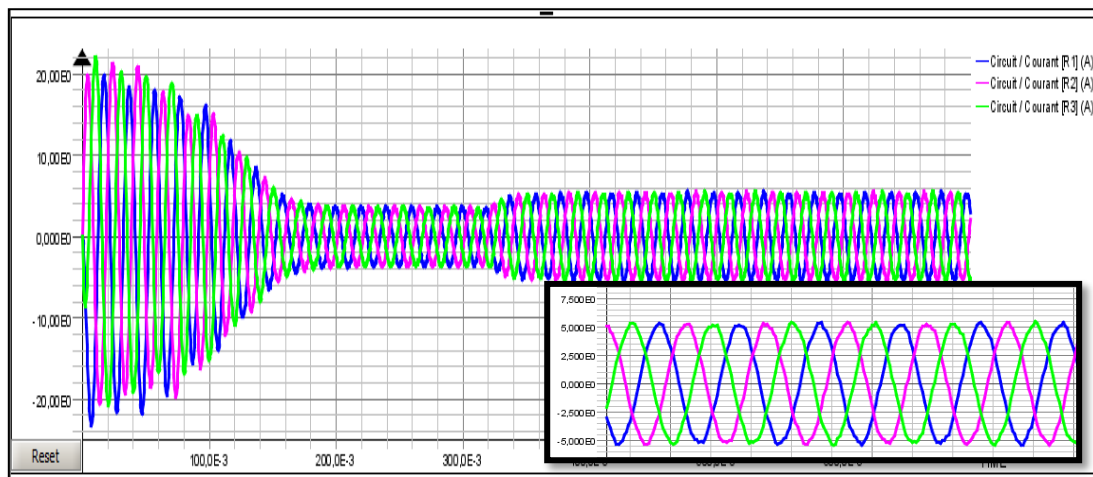


FIGURE 3-23.FORME D'ONDE DU COURANT STATORIQUE A L'ETAT SAIN EN CHARGE DE 10 NM

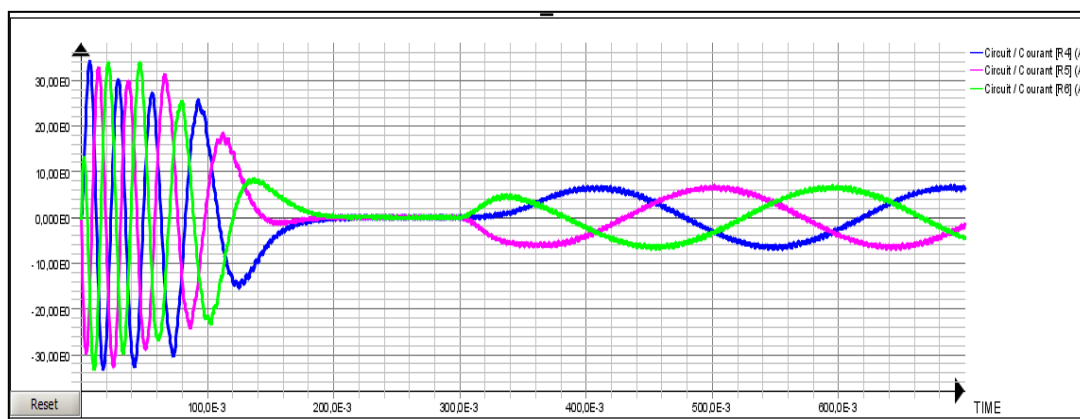


FIGURE 3-24.FORME D'ONDE DU COURANT ROTORIQUE A VIDE A L'ETAT SAIN EN CHARGE DE 10 NM



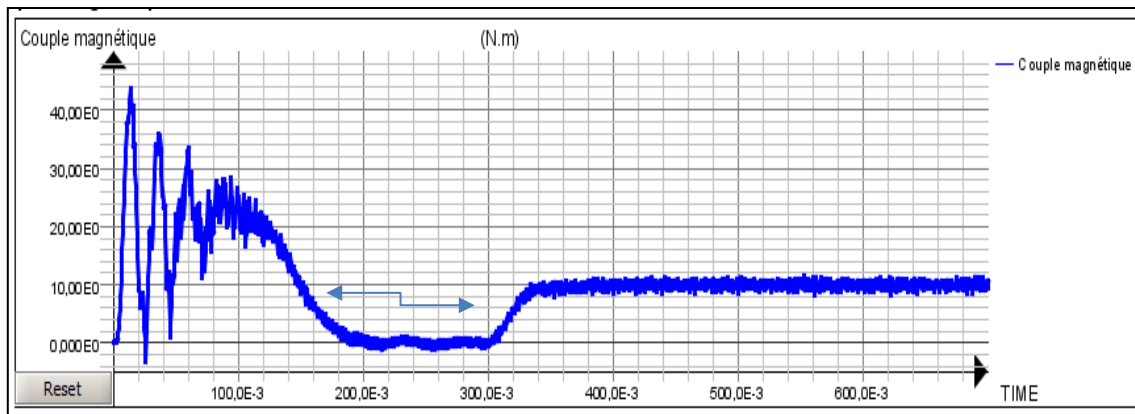


FIGURE 3-25.COUPLE ELECTROMAGNETIQUE DE LA MACHINE SAIN EN CHARGE DE 10 NM.

### 3.7.4 Résultat expérimentale a l'état sain en charge

La vitesse de rotation de moteur se stabilise à une vitesse nominale après un temps de 0,2s en régime transitoire qui est peu ondulatoire et caractérisé par une enveloppe de Perturbations très légères et un démarrage en asynchrone après l'application de charge 0,3s.et aussi la vitesse diminuée à la vitesse de synchronisme.

On note aussi une augmentation du couple électromagnétique lors de la mise sous tension pendant une durée de 0,15 seconde. Après la disparition du régime transitoire, le couple ramène le rotor à la vitesse du synchronisme où il se stabilise au voisinage de 10N.m puisqu'il y a des frottements et une charge de 10N.m exercée sur le rotor.

Les courants Statorique sont caractérisés par des pics faibles qui tendent toujours vers leurs valeurs nominales. On remarque aussi que les courants se stabilise à une valeur de 17 A et cela est dû à la charge appliquée et le courant se stabilise après un régime transitoire caractérisé par une enveloppe des oscillations a un temps de ...seconde à la valeur de 33A.

### 3.8 Simulation de la MADA à l'état déséquilibrations de tension V1= 110V :

Les résultats ci-dessous présentent les résultats des simulations du comportement électrique, magnétique et mécanique d'une machine asynchrone ayant un défaut déséquilibre de tension cette partie, nous avons diminuée la valeur de tension 220V vers 110V.

Ceci peut être produit dans une machine réelle. De même, comme le cas précédent, ce type de défaut est Aussi, la déséquilibration de tension a influencé considérablement le comportement mécanique de la machine par l'apparition des oscillations au niveau du couple

### Chapier 03 : simulation de la MADA par la méthode des éléments

ainsi que sur la vitesse de rotation de la machine ceci d'une part, d'autre part l'effet est bien évident sur le courant de phase par les ondulations de l'amplitude et les harmoniques de part et d'autre dans le spectre du fondamental.

#### 3.8.1 Tension d'alimentations déséquilibré :

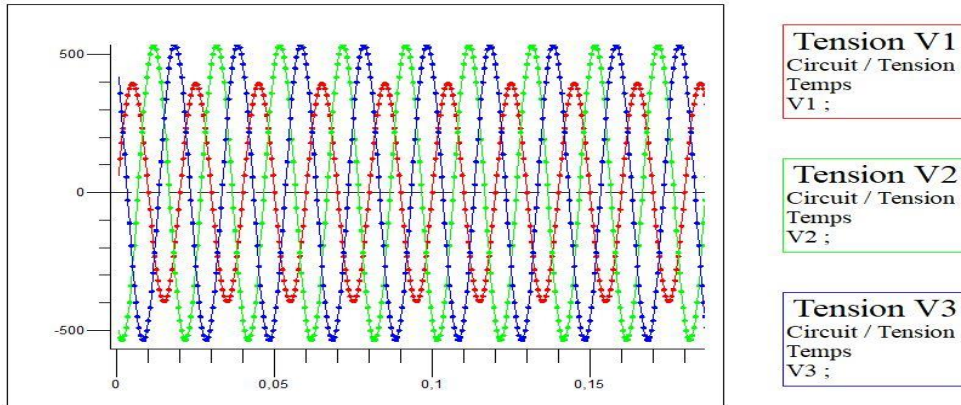


FIGURE 3-26. TENSION D'ALIMENTATION DESEQUILIBRE

#### 3.8.2 Résultat de simulation Fonctionnement à vide déséquilibrée

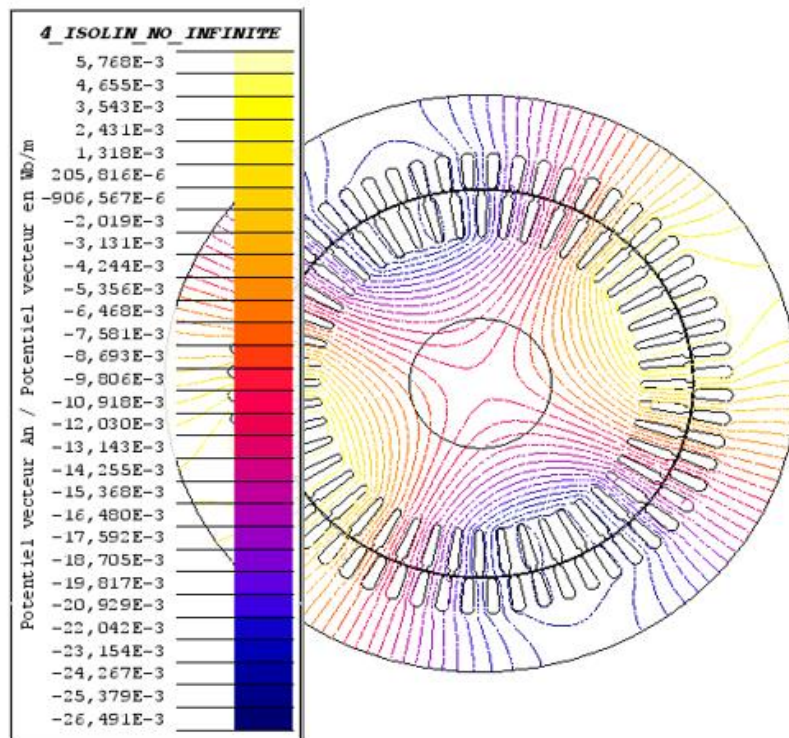


FIGURE 3-27. LA DISTRIBUTION DES LIGNES DU FLUX A VIDE A L'ETAT DESEQUILIBRE



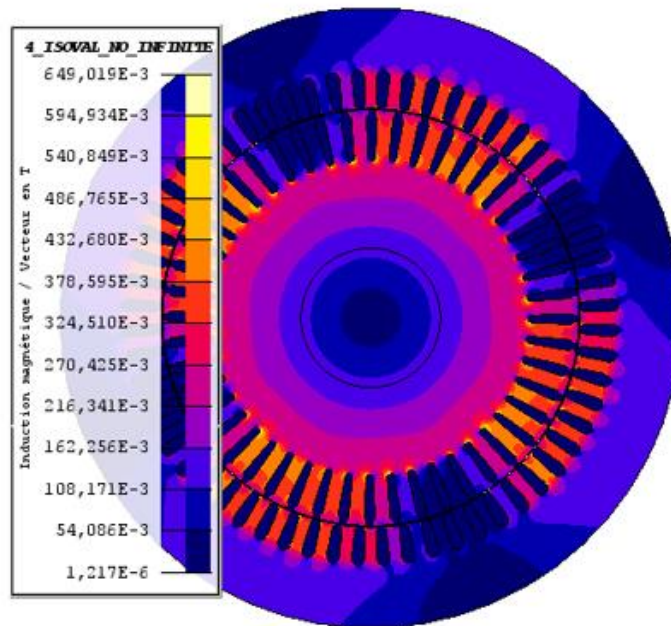


FIGURE 3-28.L'INDUCTION B A VIDE A L'ETAT DESEQUILIBREE

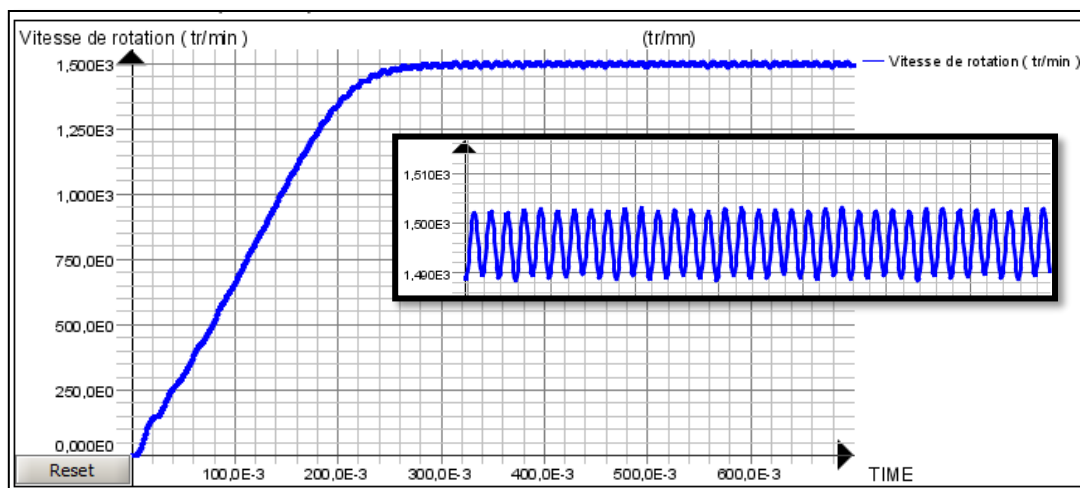


FIGURE 3-29.LA VITESSE DE ROTATION DE LA MACHINE A L'ETAT DESEQUILIBREE A VIDE

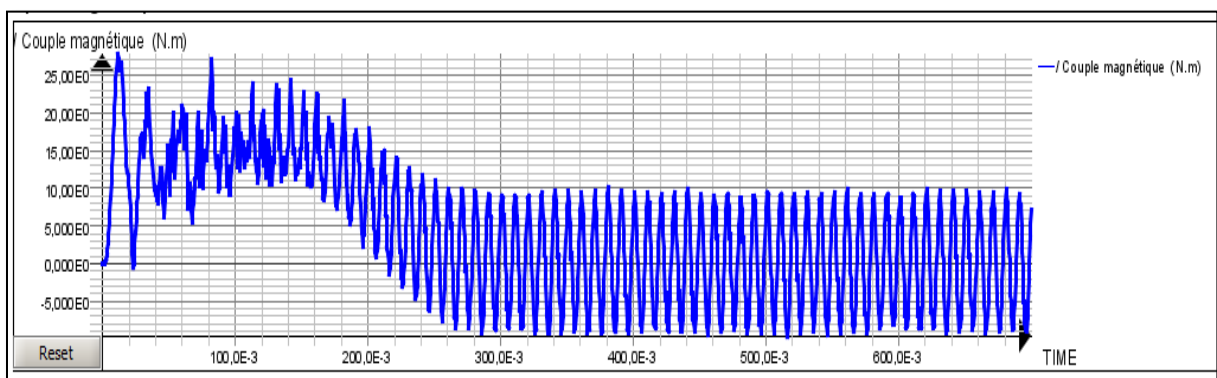


FIGURE 3-30.COUPLE ELECTROMAGNETIQUE DE LA MACHINE A L'ETAT DESEQUILIBREE A VIDE

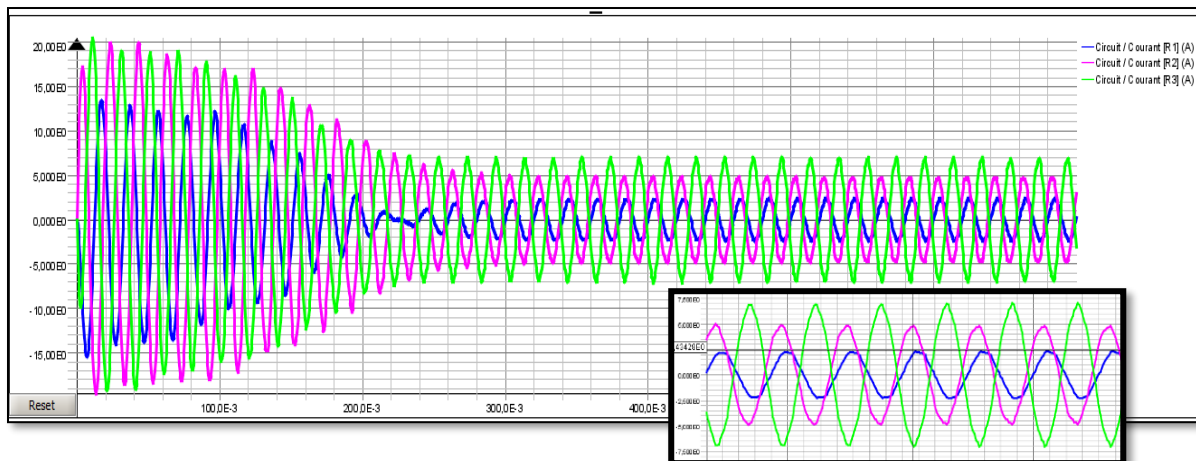


FIGURE 3-31. FORME D'ONDE DU COURANT STATORIQUE DE LA MACHINE A L'ETAT DESEQUILIBREE A VIDE

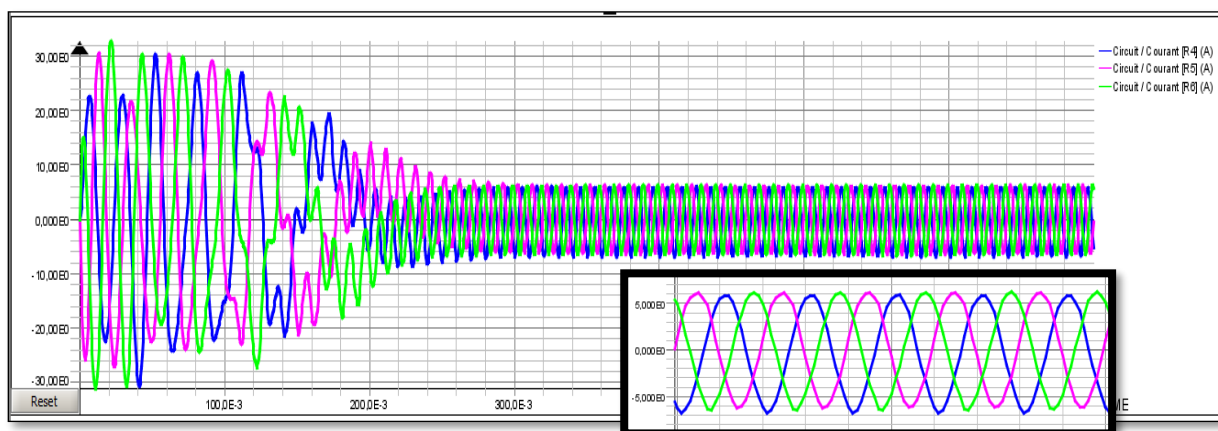


FIGURE 3-32. FORME D'ONDE DU COURANT ROTORIQUE E DE LA MACHINE A L'ETAT DESEQUILIBREE A VIDE

### 3.8.3 Interprétation des résultats :

On remarque, d'après la courbe, que la vitesse atteint la valeur nominale sans avoir des pics de démarrage, Après la disparition du régime transitoire l'allure de la Vitesse possède une augmentation de l'amplitude des ondulations.

On note également l'augmentation de l'amplitude des ondulations dans l'allure du couple. La détérioration des tensions d'alimentation réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique.

On remarque aussi une augmentation des courants statorique au niveau du 2ème et 3ème phase à cause de la diminution de la tension dans la 1ère phase.

### 3.8.4 Fonctionnement en charge de 10 Nm :

Pour le fonctionnement en charge à l'état déséquilibré en applique un couple résistant  $C_r=10$  N.m sur la machine on obtient donc les figures suivantes :

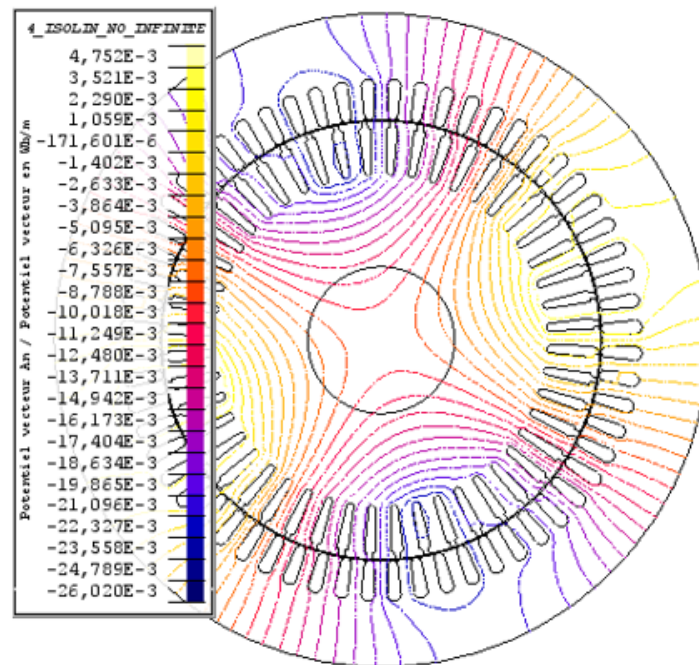


FIGURE 3-33. LA DISTRIBUTION DES LIGNES DU FLUX EN CHARGE A L'ETAT DESEQUILIBREE.

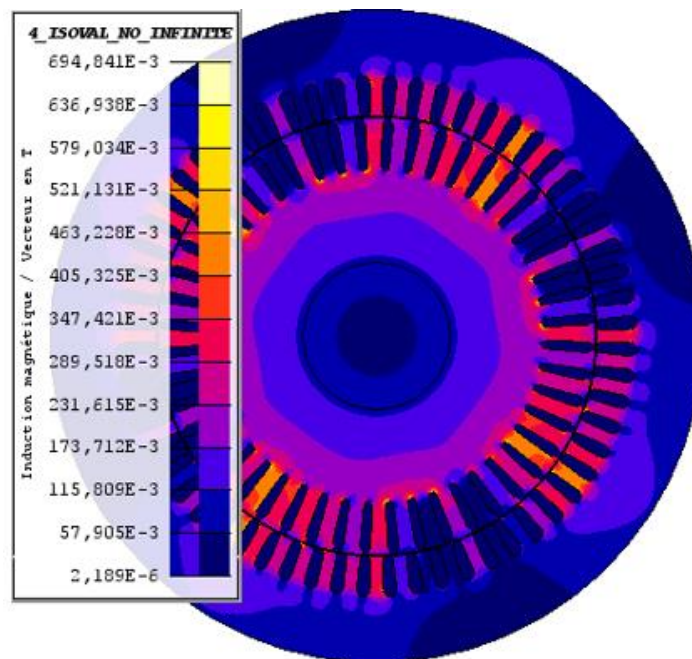


FIGURE 3-34.L'INDUCTION B EN CHARGE A L'ETAT DESEQUILIBREE

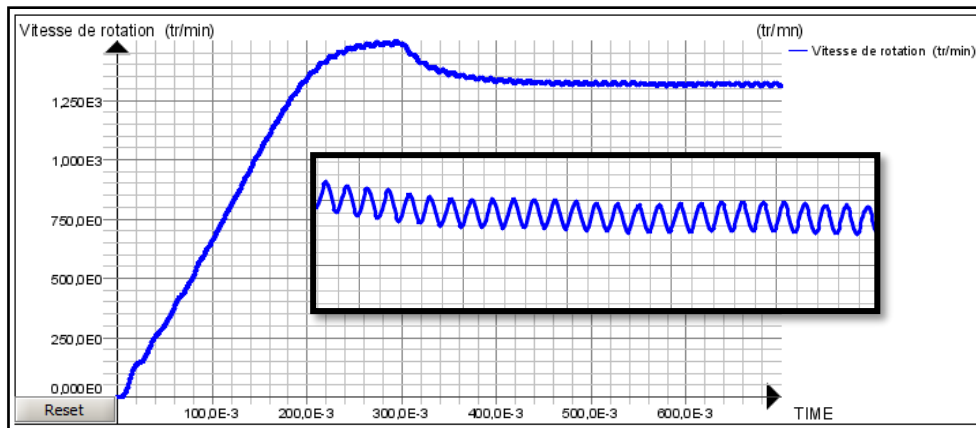


FIGURE 3-35.LA VITESSE DE ROTATION DE LA MACHINE A L'ETAT DESEQUILIBREE EN CHARGE

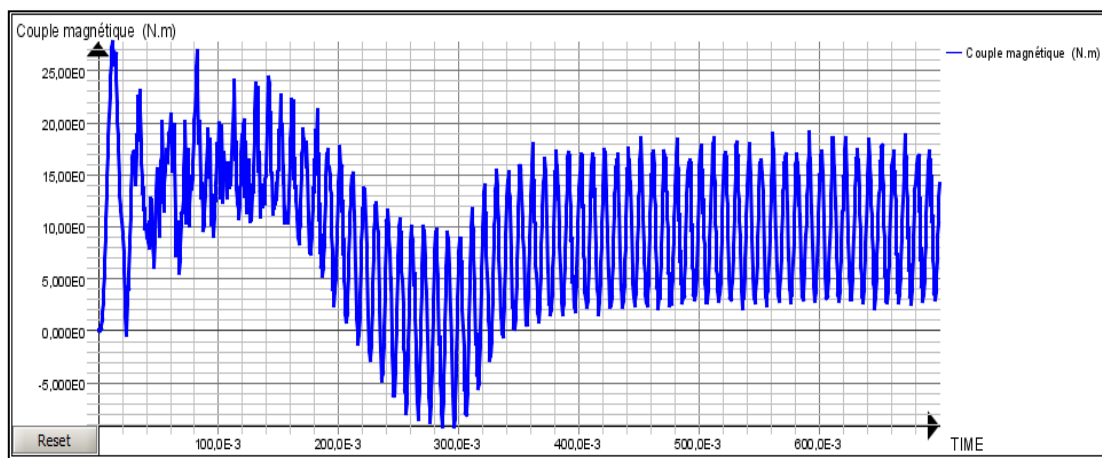


FIGURE 3-36.COUPLE ELECTROMAGNETIQUE DE LA MACHINE A L'ETAT DESEQUILIBREE EN CHARGE

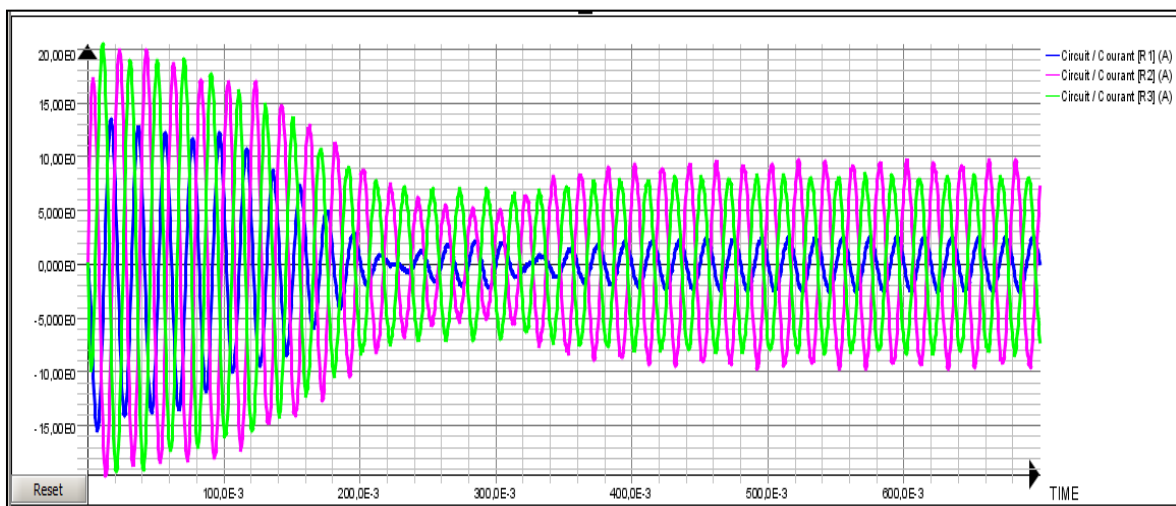


FIGURE 3-37.FORME D'ONDE DU COURANT STATORIQUE DE LA MACHINE A L'ETAT DESEQUILIBREE EN CHARGE

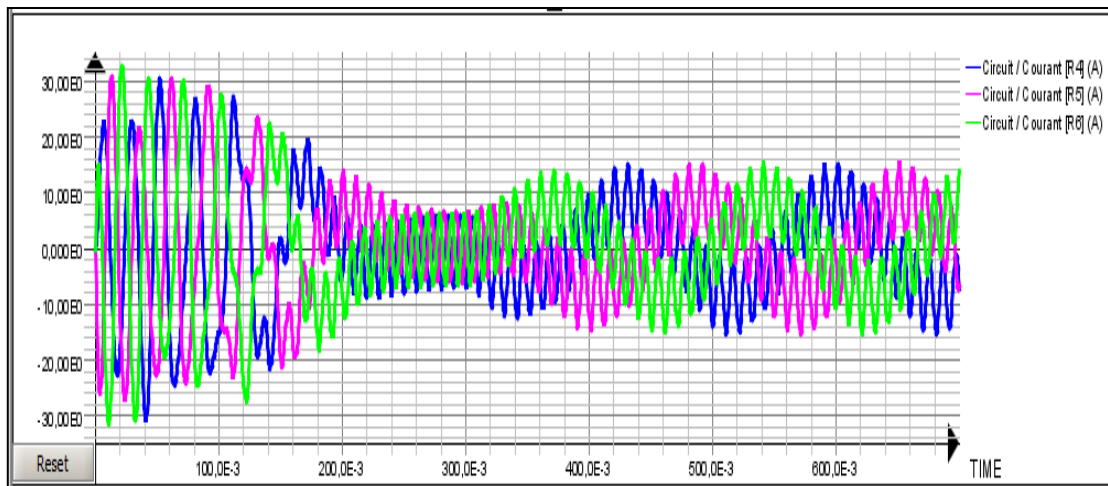


FIGURE 3-38.FORME D'ONDE DU COURANT ROTORIQUE E DE LA MACHINE A L'ETAT DESEQUILIBREE EN CHARGE

### 3.8.5 Interprétation Déséquilibre en charge

On observe de manière remarquable l'effet de la charge sur l'augmentation des amplitudes et des harmoniques a la présence du défaut déséquilibre au niveau du courbe de vitesse et couple électromagnétique.

On remarque aussi une augmentation des courants statorique au niveau du 2ème et 3ème phase à cause de la diminution de la tension dans la 1ère phase.

On a aussi une détérioration des courant rotorique à cause de la charge.

## 3.9 Tension de Neutre

### 3.9.1 Fonctionnement à vide

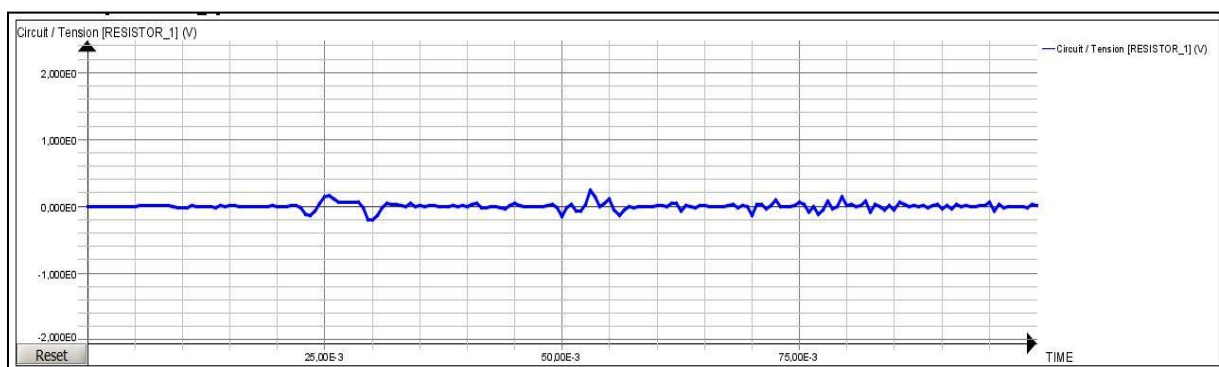


FIGURE 3-39:TENSION DE NEUTRE A L'ETAT SAIN A VIDE



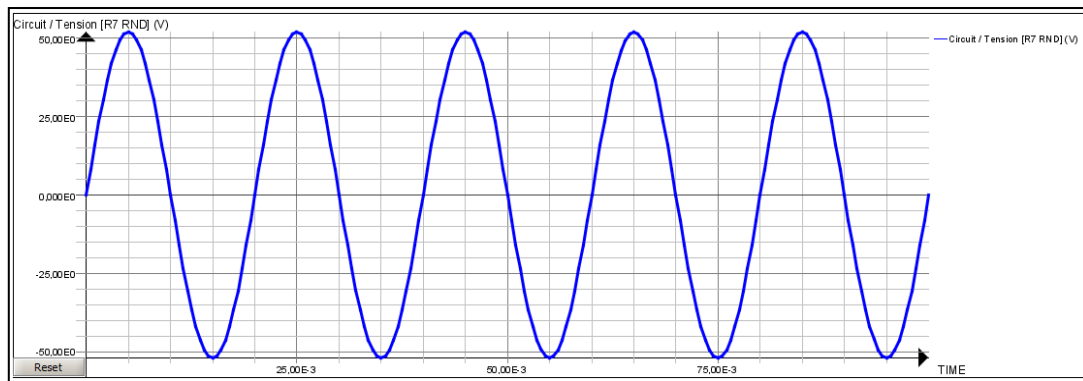


FIGURE 3-40:TENSION DE NEUTRE A L'ETAT DESEQUILIBRE A VIDE

### 3.9.2 Fonctionnement en charge

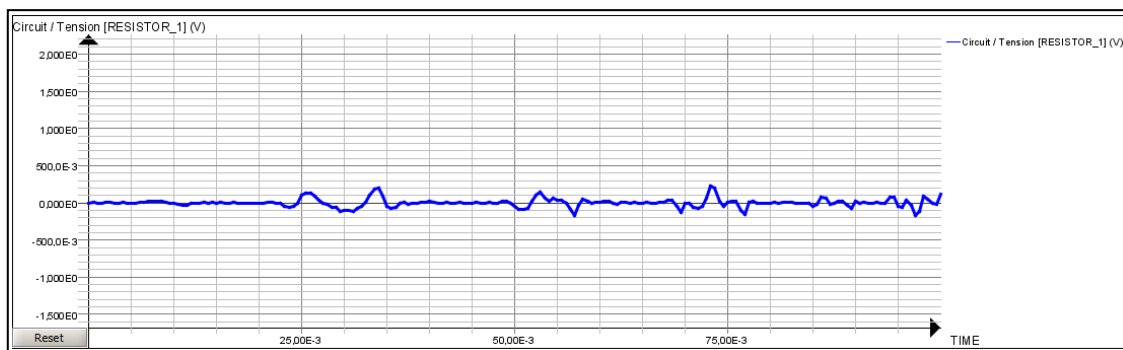


FIGURE 3-41:TENSION DE NEUTRE A L'ETAT SAIN EN CHARGE

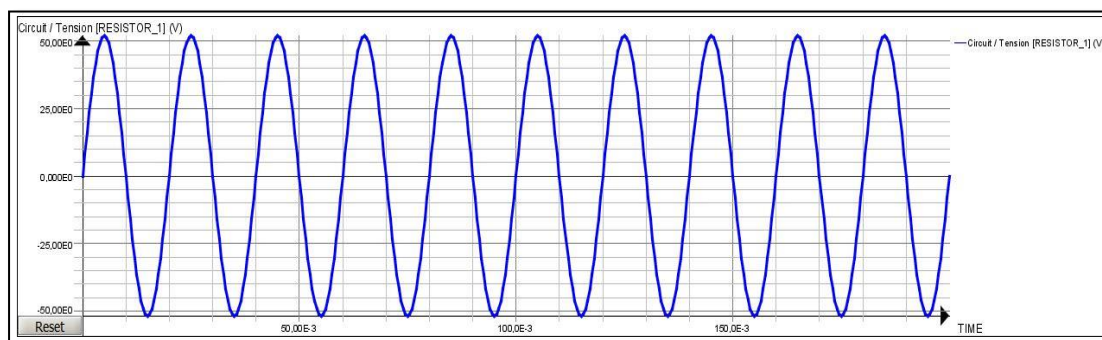


FIGURE 3-42:TENSION DE NEUTRE A L'ETAT DESEQUILIBRE EN CHARGE

### 3.9.3 Interprétation des résultats :

Dans le régime sain en charge et a vide la tension du neutre atteint une tré petite valeur  $10^{-6}$  (v) presque égale à zéro present sure la figure 3.39 et figure 3.40

Dans le régime déséquilibré la tension du neutre atteint une valeur important de 50V sous forme sinusoïdale la figure 3.41 et figure 3.42

### 3.10 Résultat de l'analyse spectrale par FFT

On applique dans cette partie la transformé de Fourier rapide FFT sur le courant de la phase 1 du moteur on obtient les résultats suivants :

#### 3.10.1 Fonctionnement a vide

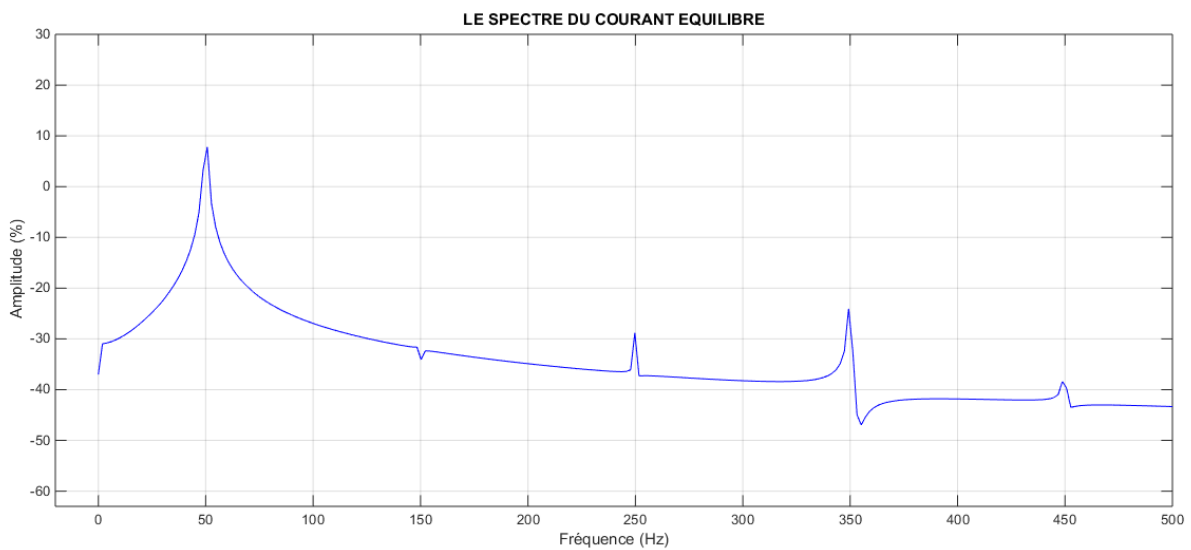


FIGURE 3-43:LE SPECTRE DE COURANT STATORIQUE A VIDE AVEC TENSION EQUILIBRE

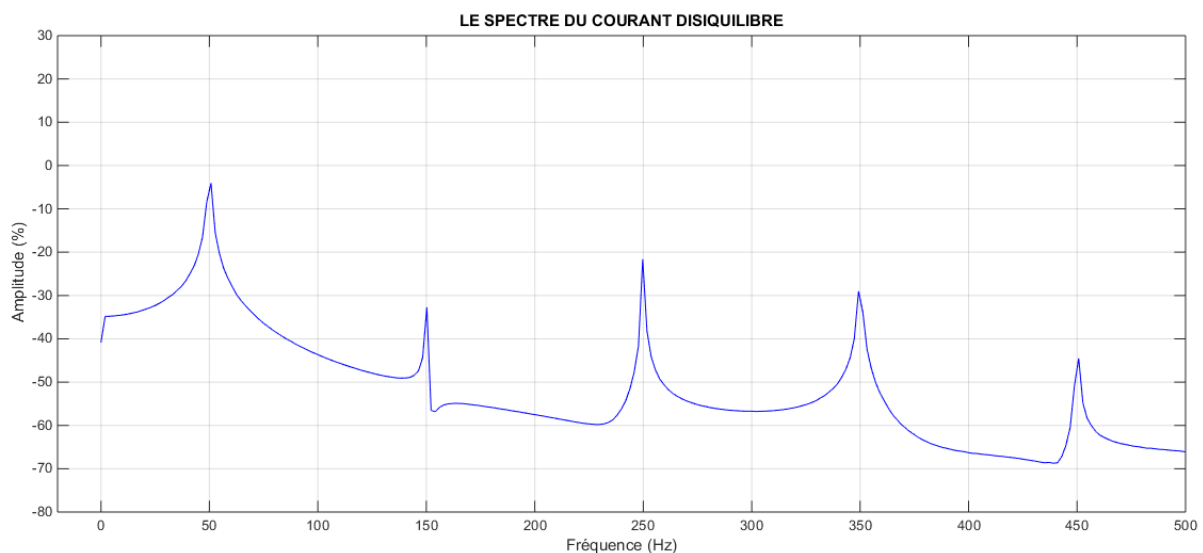


FIGURE 3-44:LE SPECTRE DE COURANT STATORIQUE A VIDE AVEC TENSION DESEQUILIBRE

### 3.10.2 Fonctionnement en charge

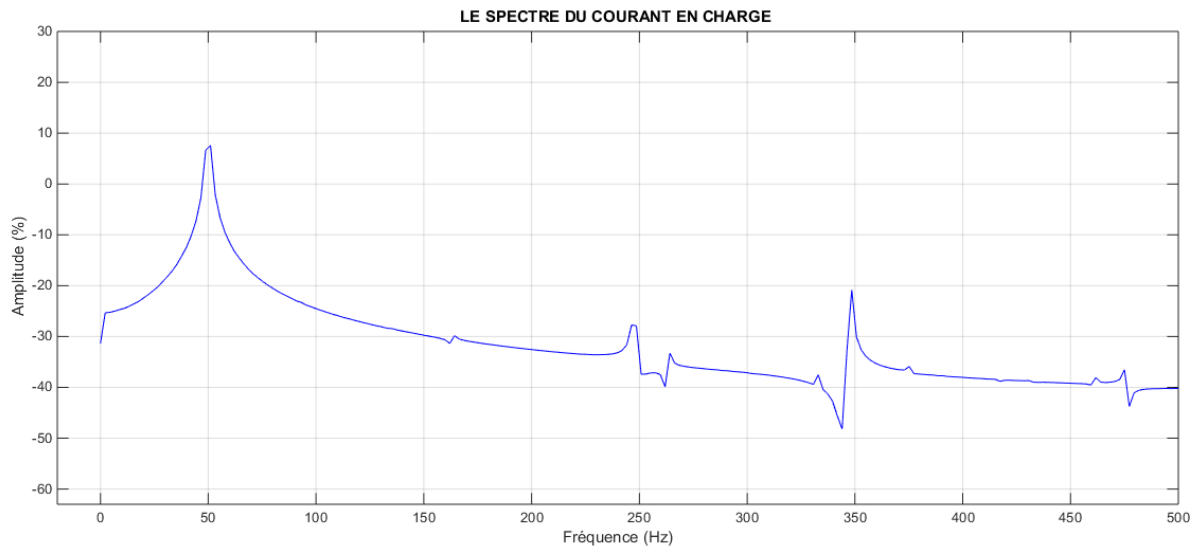
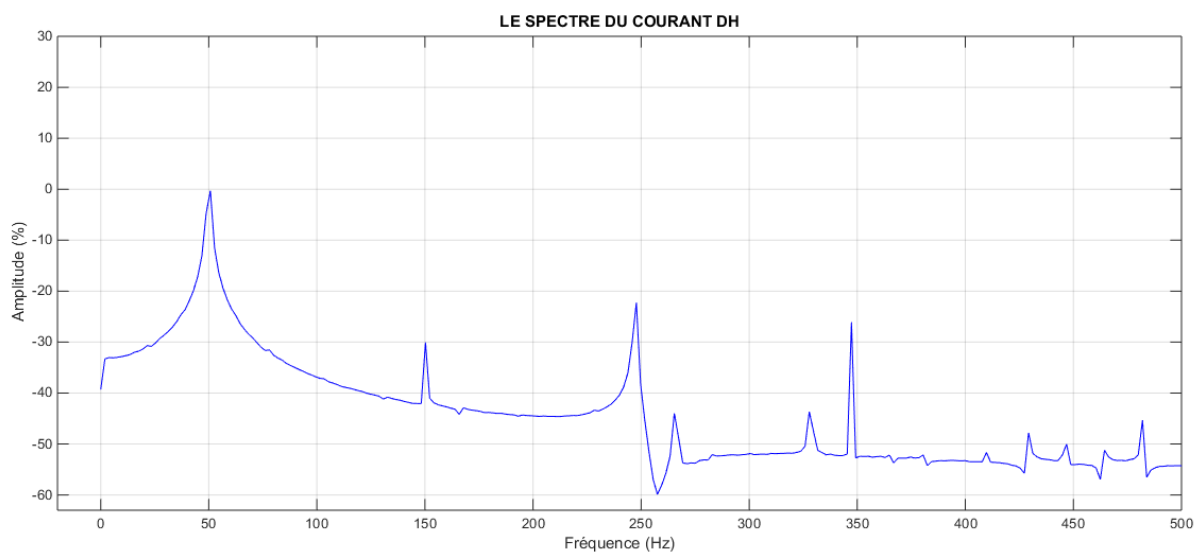


FIGURE 3-45:LE SPECTRE DE COURANT STATORIQUE EN CHARGE AVEC TENSION EQUILIBRE



ù

Figure 3-46 : Le spectre de courant statorique en charge avec tension déséquilibré

### 3.10.3 Interprétation de l'analyse spectrale

Pendant le fonctionnement de la MADA, des phénomènes divers entrent en jeu affectent particulièrement les courants d'alimentation en modifiant leur contenu spectral. Le recours à la Transformée de Fourier Rapide (FFT) dans cette étude nous permet d'analyser le



courant statorique de la machine saine et avec défauts. Présentent respectivement les spectres du courant statorique pour les deux cas ; équilibré et déséquilibré.

Après l'application de l'analyse spectrale FFT sur les courant statorique on peut dire que la pauvreté en harmoniques observée dans le spectre obtenu du modèle équilibré avec grand amplitude autour de la fondamentale est absolument incomparable avec la richesse en harmoniques du spectre obtenu du modèle déséquilibré mais avec diminution d'amplitude.

### **3.11 CONCLUSION**

Dans ce chapitre on a présenté les résultats de simulation de la modélisation de la machine étudiée pour l'état sain et déséquilibré en fonctionnement à vide et en charge. La simulation nous a permis d'étudier l'influence des défauts sur la distribution des lignes de champs et l'induction magnétique ainsi que sur les autres grandeurs.

Le déséquilibre de tension apparaît des oscillations sur les courants, la vitesse de rotation et le couple électromagnétique. Une analyse des harmoniques des courants statoriques permet de voir une corrélation entre le défaut et les amplitudes des composantes harmoniques. Enfin l'analyse présentée par la méthode des éléments finis montre que c'est une méthode efficace et peu coûteuse pour étudier l'influence des défauts électriques (déséquilibre de tension) sur le comportement des machines asynchrones, et nous a permis de comprendre et de quantifier les conséquences locales des défauts.

**CHAPITRE 4 :**  
**Etude Expérimental**

#### 4.1 Introduction :

Comme tout projet, l'expérimentation en labo ou en atelier est une étape obligatoire pour valider un prototype mais la simulation numérique s'impose comme une deuxième approche dans la plupart des disciplines. Elle ne remet nullement en cause l'efficacité de l'expérimentation mais elle s'efforce à apporter des explications aux phénomènes étudiés pour mieux comprendre et prévoir des perspectives futures.

Dans ce travail, on s'intéresse seulement à l'utilisation de la méthode de la Transformée de Fourier Rapide (FFT), elle permet de décrire n'importe quel signal par son spectre de fréquence, ce qui prêtre bien à notre étude dans la vérification où de nombreux phénomènes associés aux défauts et aussi des phénomènes physique (saturation). Les changements dans le spectre se traduisent par l'apparition des nouvelles composantes fréquentielles liées directement aux défauts ou bien au glissement ou la modification des amplitudes des harmoniques qui déjà existent dans le spectre. Dans ce présent chapitre, on va étudier expérimentalement le moteur asynchrone double alimentation en présence d'un défaut déséquilibre de tension.

L'objectif principal de cette étude est de vérifier et analyser le contenu spectral du courant statorique de la machine avant et après le défaut.

#### 4.2 Mode de détection des défauts par traitement du signal

L'objectif des méthodes de diagnostic et de surveillance de MAS à partir des informations données par des capteurs sont placés au niveau de l'armoire électrique. Les signaux utilisés sont les tensions, les courants et les flux de MAS. Les informations données par les différents capteurs peuvent être utilisées séparément ou traitées dans l'ensemble pour détecter les défauts électriques affectés au MAS.

Dans cette étude on s'intéresse par les méthodes basées sur l'analyse des courants statoriques. Ces méthodes, couramment appelées MCSA (Motor Current Signal Analysis), présentent l'avantage de n'utiliser que des capteurs de courant.

Dans le cas particulier de la surveillance et du diagnostic, les méthodes qui reposent sur une approche signal dont la méthode de traitement numérique de base utilisée est la transformée de Fourier rapide (FFT), nous permettront de détecter l'apparition d'un défaut à partir de la comparaison de la signature observée en mode dégradé avec une signature de référence qui

utilise des caractéristiques temporelles, fréquentielles et éventuellement statistiques des signaux.

### 4.3 Effets des défauts Electriques sur les courants statoriques

Dans les spectres du courant, il y a la présence d'harmoniques conditionnés par la qualité de la tension d'alimentation et les harmoniques qui peuvent provenir suite au défaut de fabrication de la machine elle-même. Quoique l'on utilise les nouveaux Matériaux actifs et les nouvelles technologies de fabrication on ne peut concevoir la machine idéale.

Seulement, dans ce travail de diagnostic ce spectre est considéré comme référentiel et toute émergence de nouvel harmonique ou de modifications dans les amplitudes de celles déjà existantes nécessite une interprétation. Ainsi, les anomalies du moteur et des mécanismes qui lui sont accouplés font apparaître aussi des harmoniques correspondants dans le spectre du courant. Les plus grandes dynamiques présentes dans le spectre du courant se produisent à la fréquence d'alimentation électrique et ses harmoniques.

Les défauts de déséquilibre électrique et de mauvais branchement en générale sont détectés par la lecture des fréquences des harmoniques appropriés de la phase du courant statorique.

$$f_{def.} = n f_s \quad \text{Avec } n \in \mathbb{R}^{*+} \text{ et impair}$$

### 4.4 Les étapes de réalisation de la technique du diagnostic :

Notre réalisation pratique a été faite en deux parties :

- ✓ La première partie est la conception de tout le système électrique.
- ✓ La deuxième partie est l'affichage des photos des essais avec interprétation de résultat.

La première partie de notre projet est très importante, on est passé par plusieurs étapes :

- Chercher les différentes structures des blocs constituant notre maquette et qui vont avec les Objectifs fixés et les moyens disponibles.

Dans la deuxième partie « réalisation pratique », on passe par l'étape suivante :

- Présenter les différentes étapes de la réalisation pratique :

- Réalisation d'un montage de démarrage du moteur avec un couplage étoile.
- Utilise 3 transformateurs pour modifier la tension de l'alimentation et crée le déséquilibre dans une phase.

- Prend des signaux depuis l'analyseur de qualité d'énergie.
- faire le traitement de ces signaux par un programme implanté dans matlab.
- Commencé une comparaison entre les signaux dans les deux cas sains et défaillant et déduire une relation entre ces deniers pour identifier directement le type de défaut par une simple lecture des signatures des courants statiques.

#### 4.5 Description du banc de mesures.

Le schéma synoptique du banc de mesures et traitement des signaux réalisé est le suivant :

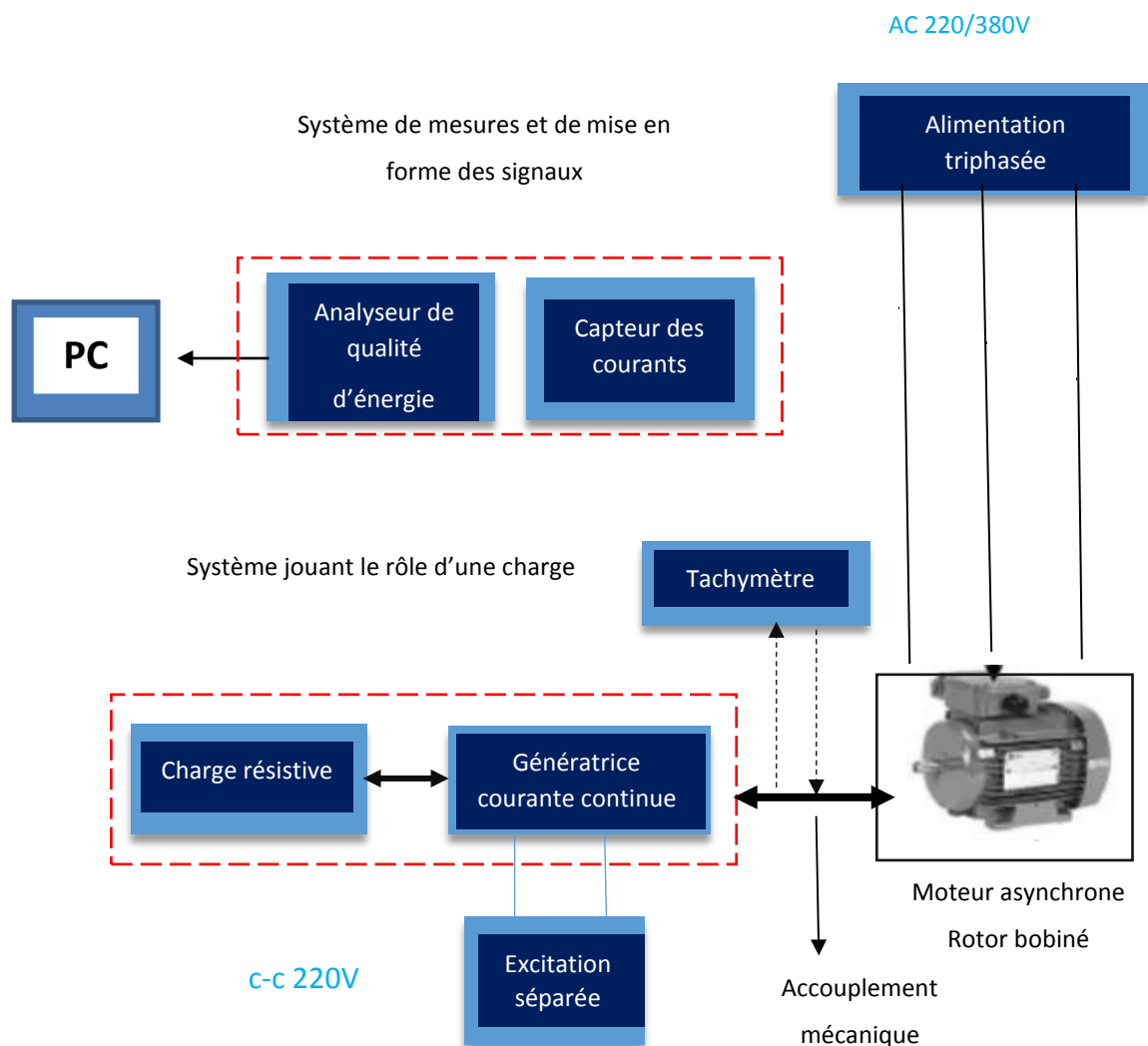


FIGURE 4-1: PRESENTATION BANC DE MESURE ET TRAITEMENT DES SIGNAUX

Nous présentons dans ce paragraphe le banc expérimental qui a utilisé au tout long de ce travail. La plate-forme d'essais comporte une machine asynchrone à rotor bobiné de puissance de 2KW, et de tension d'alimentation de 220 /380 V, triphasé et à 4 pôles. Le moteur

est alimenté directement par un bloc d'alimentation du laboratoire (220 volts, 50 Hz). Pour réaliser une charge, La sortie du moteur est couplée via une courroie à génératrice à courant continu qui débite dans un rhéostat afin de contrôler la charge. La cinématique du banc d'essai est représentée par la figure suivant

L'acquisition des signaux du courant est effectuée par l'intermédiaire d'un analyseur de qualité.

Un tachymètre fixé sur le palier. Les tensions électriques sont acquises par 3 sondes différentielles et les courants absorbés par 3 pinces ampèremétriques.

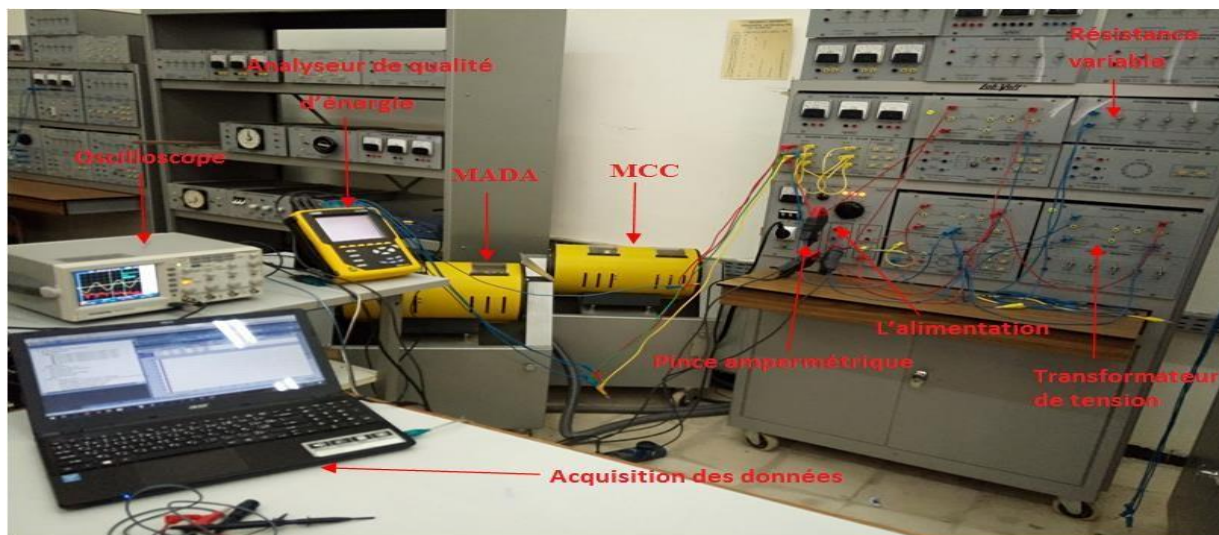


FIGURE 4-2 : BANC D'ESSAI

Ce banc d'essai est composé des parties suivantes :

- Une source triphasée : L'alimentation est en régime sinusoïdale permanent. La fréquence d'alimentation est de 50 Hz.
- Moteur asynchrone a rotor bobiné
- Une génératrice

Le moteur asynchrone est accouplé mécaniquement à une machine à courant continu fonctionnant en génératrice. Celle-ci alimente une batterie de résistances, jouant ainsi le rôle d'une charge résistive variable afin de varier le couple résistant et donc le courant d'alimentation du moteur d'essai.

- Module de mesures constitué de trois capteurs de courant
- Analyseur de qualité d'énergie

- Un micro-ordinateur Le micro-ordinateur a pour rôle d'analyser, de traiter et d'afficher les résultats.

- Trois transformateurs a pour modifier la tension de l'alimentation et crée le déséquilibre dans une phase.
- Oscilloscope
- Résistance variable

#### **4.5.1 Déroulement d'un essai :**

Alimentation du moteur asynchrone type rotor bobiné par une tension triphasé variable via un autotransformateur puis application d'une charge sur la génératrice de tel sorte que le courant de ligne du moteur soit égal au courant nominale.

- Application d'un défaut déséquilibre de tension d'une seule phase d'alimentation par l'un des trois transformateurs.

- Mesure du courant des 3 phase phases à travers les capteurs de courant et enregistrement des valeurs mesurées via un analyseur de qualité d'énergie données connectée à un micro-ordinateur. Ces mesures se font pour le moteur sain et pour le cas présence de défaut.

- Analyse des données mesurées par un programme de transformé de Fourier sous Matlab pour étudier le contenu spectral du signal mesuré.

En général, la densité spectrale de fréquence du courant statorique contient en plus du fondamental, les harmoniques suivantes :

- Harmonique de temps dû à la pollution de la source d'alimentation (variation par fluctuation de l'alimentation du réseau ou perturbation dû à l'alimentation par des onduleurs).
- Harmonique d'espace dû à la répartition non sinusoïdale des enroulements.
- Harmoniques dû à la présence de défauts.
- Harmonique dû à la saturation du circuit magnétique.
- Harmonique dû à la variation de la charge.

#### **4.5.2 Modes de fonctionnements :**

Tous les essais ont été effectués à chaud afin de se rapprocher au maximum du cas réel, les modes de fonctionnement et les différents types d'essais sont regroupés dans le tableau suivant :

Mode de fonctionnement	Types d'essais
Moteur à l'état sain	Essai à vide Essai en charge
Moteur à l'état défectueux	

TABEAU 4-1 :: LES MODES DE FONCTIONNEMENT TRAITES

L'analyse du spectre du courant pour différentes modes de fonctionnement (à vide et en charge) nous a permis de tester l'efficacité du teste en cas d'une vitesse variable.

#### 4.6 Résultats expérimentaux et Analyse

Analyse du spectre du courant statorique de la machine :

Dans le domaine de diagnostic des machines électriques tournantes, il est indispensable de faire l'analyse spectrale du signal à traiter préalablement à l'état sain puis à l'état déséquilibré, dans le but de synthétiser tous les harmoniques qui existent déjà dans le spectre, sans oublier que les conditions de fonctionnement (en charge) affectent fortement sur les amplitudes et les fréquences des amplitudes. Dans ce paragraphe nous exposons les spectres du courant statorique de la machine asynchrone double alimentation pour différentes conditions de fonctionnement (à vide et en charge).

##### 4.6.1 Essais à vide en régime sain :

La machine à l'état sain est alimentée par trois tensions simples équilibrées ( $V_1=190.5$  ;  $V_2=192.4$  ;  $V_3=190.8$ )

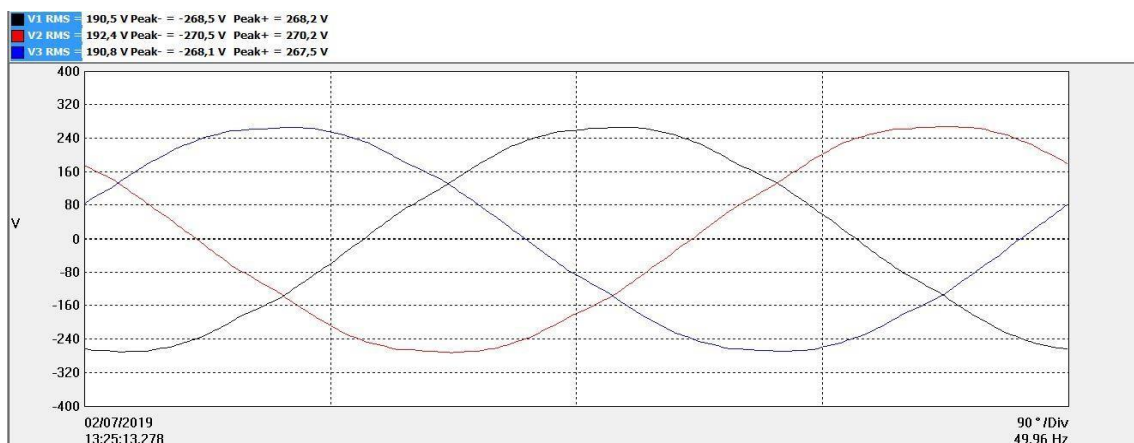


FIGURE 4-3 : REPRESENTATION TEMPORELLE DES TENSIONS STATORIQUE EQUILIBRE.





FIGURE 4-4 : REPRESENTATION TEMPORELLE DES COURANTS STATORIQUE EQUILIBRE.

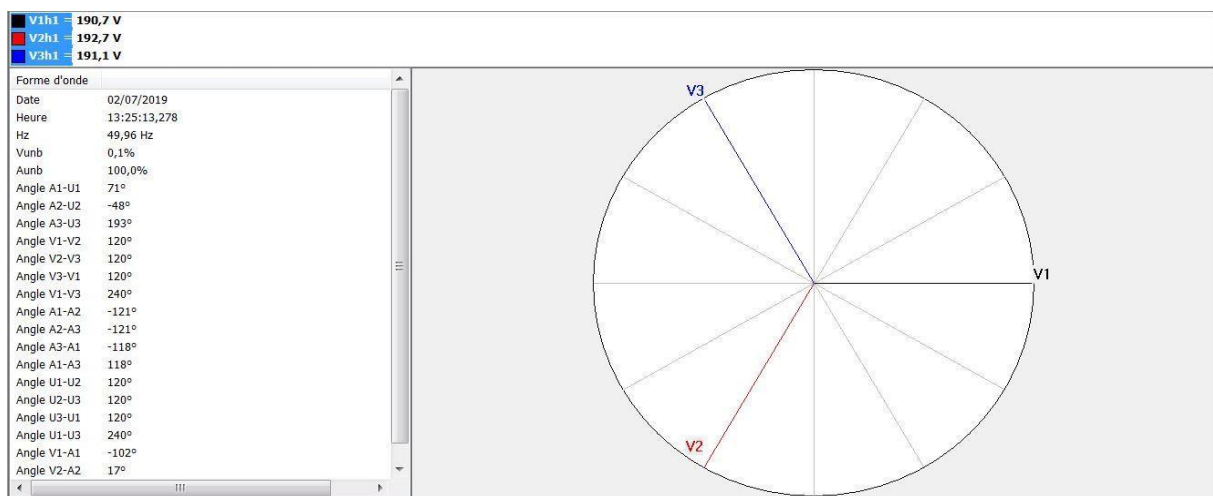


FIGURE 4-5 : REPRESENTATION L'EQUILIBRAGE DES COURANTS STATORIQUE EQUILIBRE.

#### 4.7 Essais à vide en régime déséquilibré :

A l'état déséquilibré on applique une tension de 110 v sur la troisième phase.

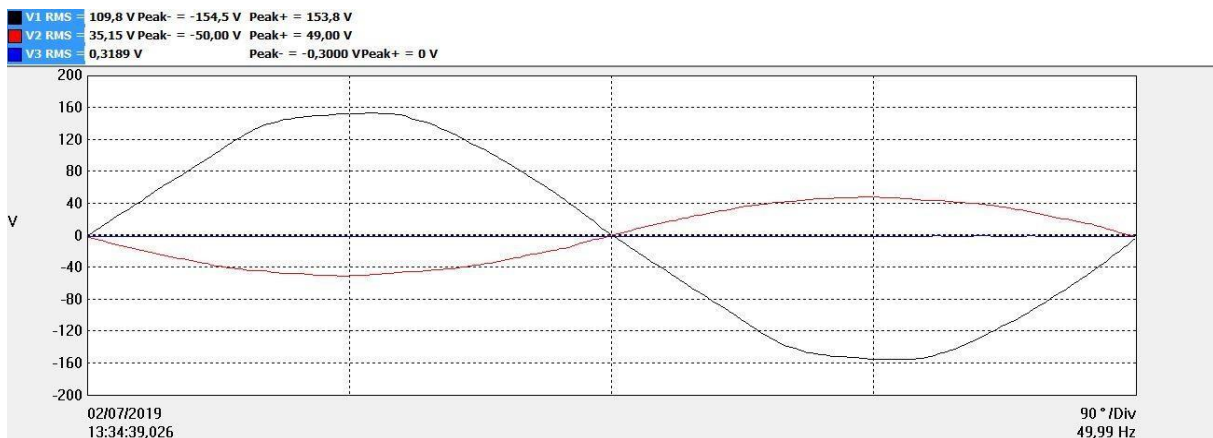


FIGURE 4-6 : REPRESENTATION DES TENSIONS STATORIQUE DESEQUILIBRE AVEC NEUTRE.

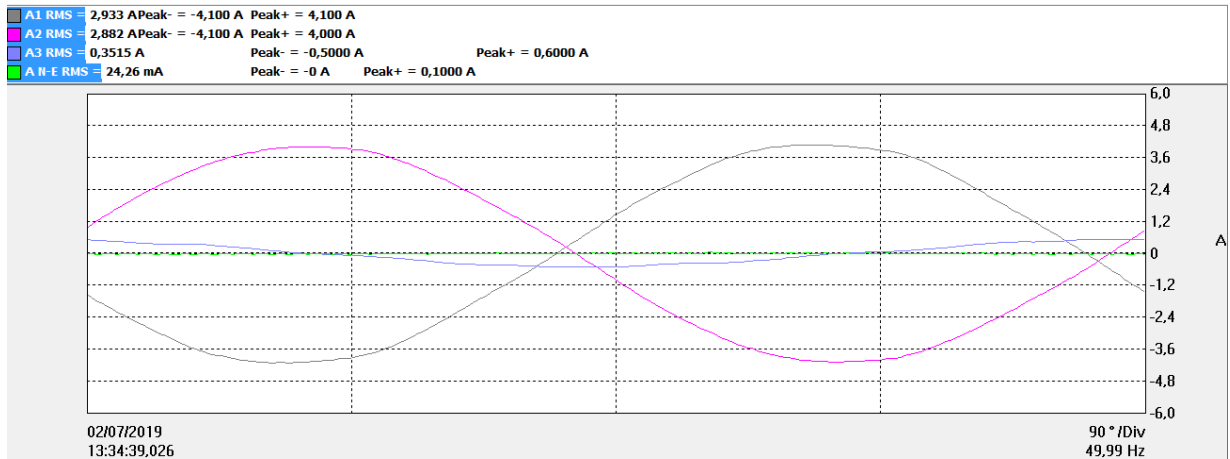


FIGURE 4-7 : REPRESENTATION DES COURANTS STATORIQUE DESEQUILIBRE AVEC COURANT NEUTRE.

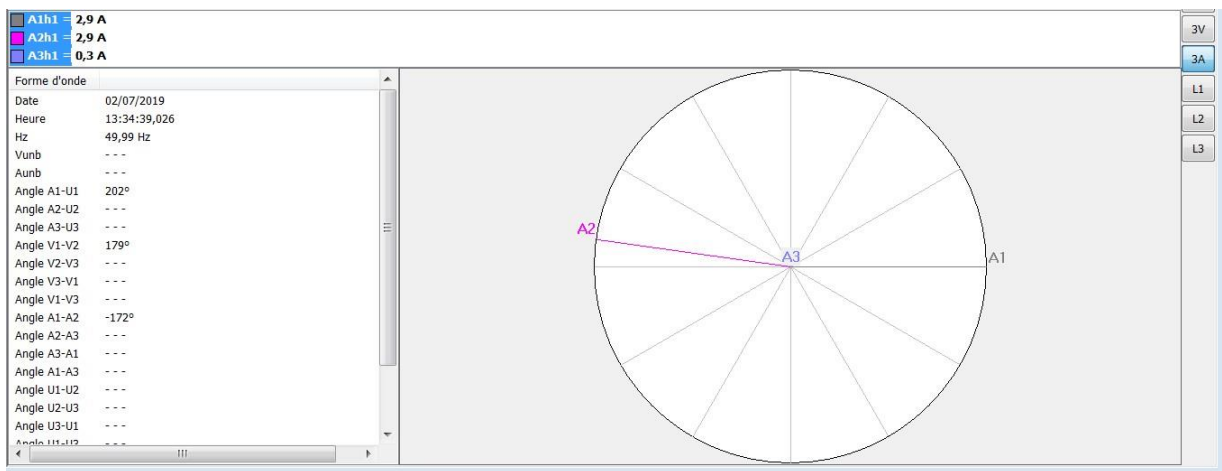


FIGURE 4-8 : REPRESENTATION DES COURANTS STATORIQUE DESEQUILIBRE.

### 4.7.1 Interprétation des résultats

Dans le régime sain les courants statoriques sont égaux (2,3 A) et on remarque que le réseau n'est pas parfait et Ya des petites chutes de tension. Par contre au régime déséquilibré on constate une grande variation entre les valeurs maximales des trois courant statorique et sur le déphasage, nous remarquons une baisse significative au niveau de l'intensité du courant dans la 3ème phase (0,3 A) qui a le déséquilibre et le contraire pour les deux autres phases (2,9 A) cette augmentation c'est pour compenser l'absence du courant dans la phase 3. On a aussi une petite augmentation de la densité du courant du neutre

4.7.2 Résultat de l'analyse spectrale par FFT

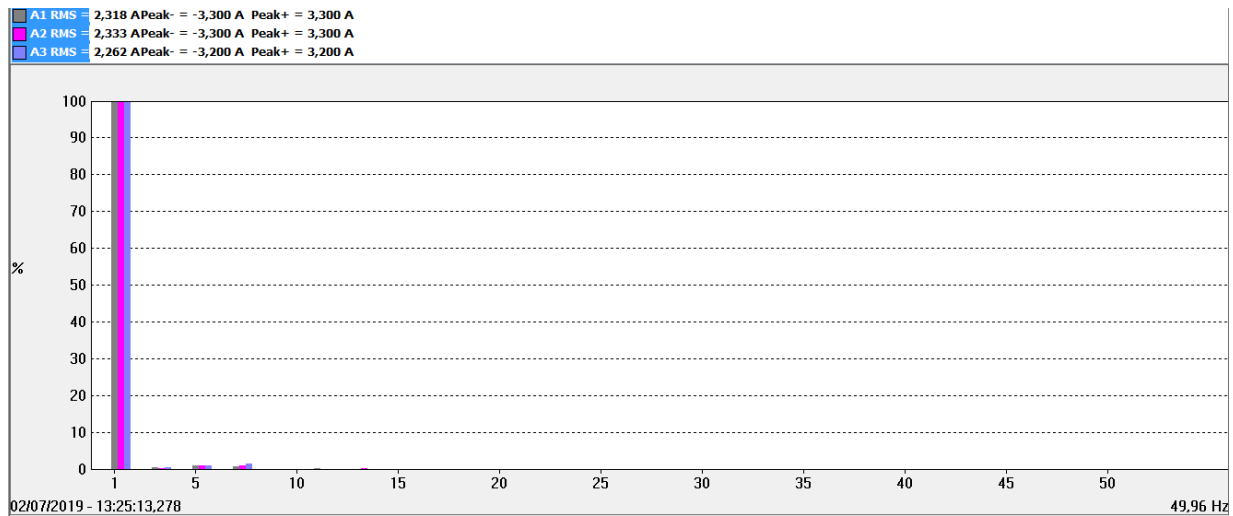


FIGURE 4-9 : LES SPECTRES DU COURANT STATORIQUE A VIDE EQUILIBRE

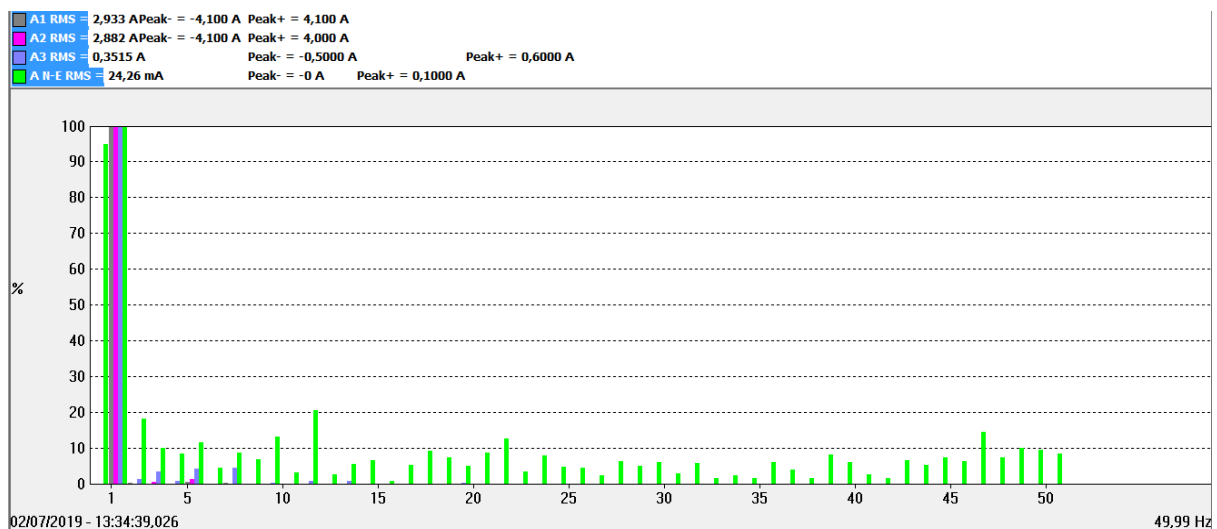


FIGURE 4-10 : LES SPECTRES DU COURANT STATORIQUE A VIDE DESEQUILIBRE

4.7.3 Interprétation de l'analyse spectrale :

A l'état sain, on observe des raies latérales de petite amplitude autour de la fondamentale 50hz, à cause de la perturbation dans l'alimentation.

Lors d'un déséquilibre de la tension d'alimentation au niveau de la première phase, on remarque aussi des composants voisine au fondamental correspondant d'ordre 3, 7, 9, la différence entre les deux derniers résultats justes sur l'amplitude des spectres autour de la fondamentale.

#### 4.1 Synthèse des techniques du diagnostic utilisé :

On fait une synthèse des techniques du diagnostic utilisées dans cette étude par la présentation de cet organigramme explicatif de notre méthodologie de détection et du diagnostic des défauts électriques que nous avons ciblé dans notre étude.

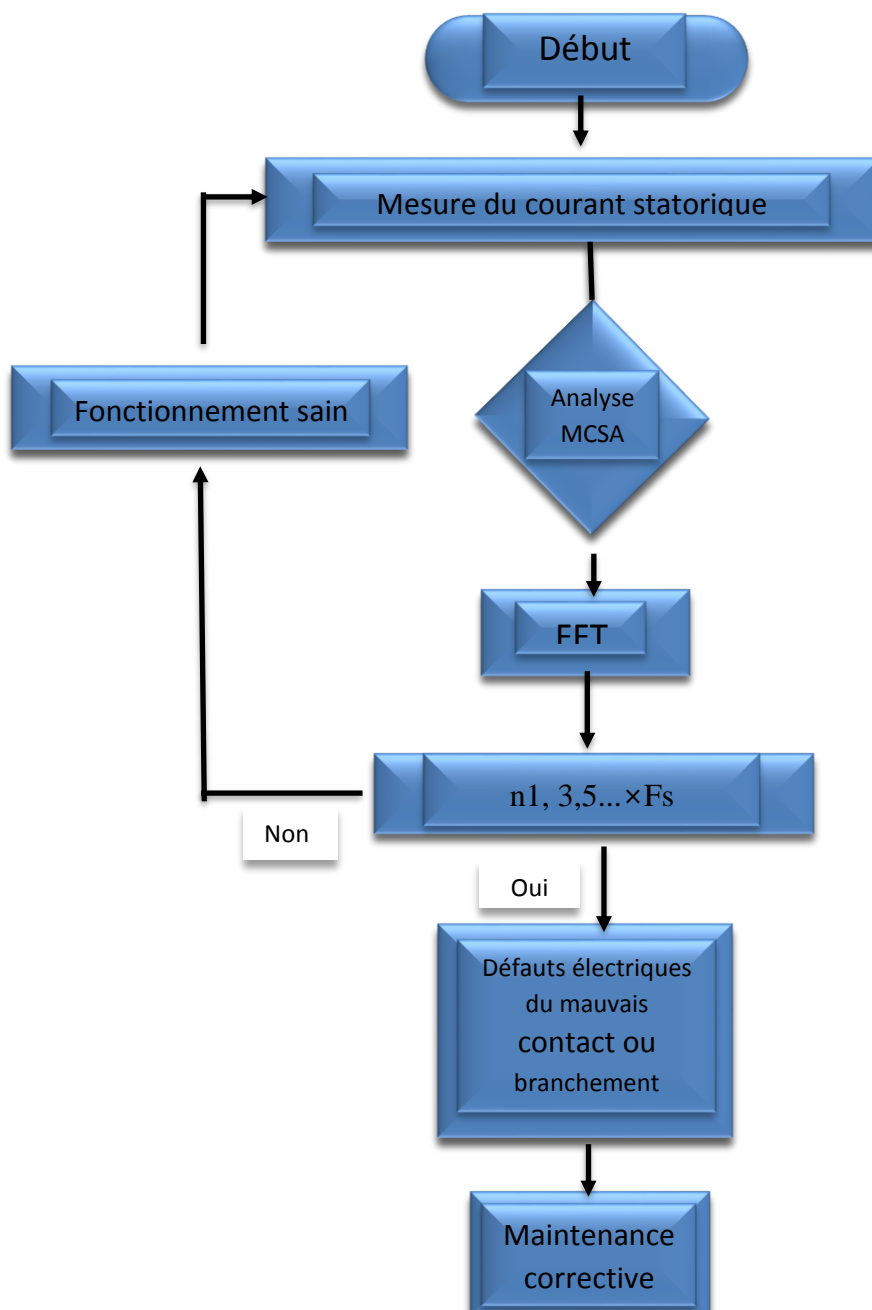


FIGURE 4-11 : SYNTHESE DU DIAGNOSTIC ETUDIE

Afin de synthétiser cet organigramme (figure 4.11) nous tenons à résumer notre contribution sur le diagnostic et la détection efficace et simple et à l'extraction de manière

précise des informations relatives aux défauts électriques du mauvais contact ou branchement des moteurs asynchrones en se s'adressant vers le spectre des courants statoriques (FFT)

## **4.2 CONCLUSION**

Dans ce chapitre on a représenté les résultats expérimentaux et leurs interprétations pour une machine asynchrone a rotor bobiné saine et avec un défaut déséquilibre de tension, les essais sont effectués pour différentes mode de fonctionnement (à vide et en charge)

Et grâce à la réalisation de notre expérimentation nous a avons d'une part visualisée les signaux temporel et fréquentiel, et d'autre part en utilisant l'analyse spectrale du courant statorique nous a permet de détecter les défauts.

Le déséquilibre de phase est détecté par l'augmentation de l'amplitude de l'harmonique du courant à la fréquence de 150,250 et 350 Hz.

# **Conclusion générale**

## Conclusion Générale

Le travail qui a été présenté dans cette mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones à doubles alimentations. Nous avons montré que les principaux éléments de la machine asynchrone peuvent présenter des défaillances totales ou partielles provoquant un arrêt inattendu, qui conduit à des pertes économiques considérables.

Pour éviter ces problèmes, il est impératif de mettre en œuvre des systèmes de surveillance adéquats.

Le début de ce mémoire a été marqué par un rappel des différents défauts qui peuvent affecter le bon fonctionnement des machines asynchrones à doubles alimentations, ainsi que leurs causes et leurs signatures spectrales. Selon la littérature et la brève présentation des diverses méthodes du diagnostic, nous avons constaté que l'analyse du courant statorique est la méthode la plus utilisée vu sa simplicité et son efficacité de prévoir un défaut dès lors que ses premiers signes commencent à apparaître, ce qui nous a incité à adopter les signaux du courant statorique dont le spectre contient les hautes et les faibles fréquences.

Afin de représenter le comportement de la machine lors d'un fonctionnement normal (sans défaut) et dégradé (avec défaut), nous avons créé un modèle par les éléments finis qui tient compte de la topologie et de dimensions de la machine. Ce modèle présente l'avantage qu'il prend en considération le circuit magnétique de fer, cela conduit à introduire la courbe  $B(H)$  avec saturation dans les calculs.

Les résultats trouvés sont très satisfaisants et sont conformes avec ceux de la littérature. Nous avons pu observer les ondulations sur les grandeurs courant, couple et vitesse ainsi que leur accroissement lors de l'augmentation de la charge avec un défaut déséquilibre de tension.

Nous avons utilisé le programme de la transformée de Fourier rapide du "Toolbox Matlab", pour exploiter le contenu spectral des courants statoriques et de leurs transformés et par conséquent de déterminer les composantes fréquentielles caractérisant le défaut déséquilibre de tension. Nous avons trouvé que l'amplitude de ces harmoniques augmente avec l'augmentation de la charge exercée sur le moteur. Ceci, donne une indication sur la sévérité du défaut.

L'inconvénient de cette méthode (éléments finis-Flux 2D) reste le temps de calcul qui est très long et qui demande un ordinateur très puissant, élément non disponible dans notre possession.

## Conclusion Générale

Enfin, il nous semble intéressant d'avoir une analyse continue du courant afin de surveiller le fonctionnement de la machine en ligne, et d'assurer ainsi une maintenance préventive.



## Conclusion Générale

# Annexes

## Régent surfacique

### 1. Statorique

région	Type de Régine	Matériau de région	Composant électrique de région	Ensemble mécanique	Nombre de spire du conducteur
SSA_1	Conducteur bobine	Cuivre	B1	FIXED STATOR	16
SSA_2	Conducteur bobine	Cuivre	B2	FIXED STATOR	16
SSA_3	Conducteur bobine	Cuivre	B3	FIXED STATOR	16
SSA_4	Conducteur bobine	Cuivre	B4	FIXED STATOR	16
SSA_5	Conducteur bobine	Cuivre	B5	FIXED STATOR	16
SSA_6	Conducteur bobine	Cuivre	B6	FIXED STATOR	16
SSA_7	Conducteur bobine	Cuivre	B7	FIXED STATOR	16
SSA_8	Conducteur bobine	Cuivre	B8	FIXED STATOR	16
SSA_9	Conducteur bobine	Cuivre	B9	FIXED STATOR	16
SSA_10	Conducteur bobine	Cuivre	B10	FIXED STATOR	16
SSA_11	Conducteur bobine	Cuivre	B11	FIXED STATOR	16
SSA_12	Conducteur bobine	Cuivre	B12	FIXED STATOR	16
SSA_13	Conducteur bobine	Cuivre	B13	FIXED STATOR	16
SSA_14	Conducteur bobine	Cuivre	B14	FIXED STATOR	16
SSA_15	Conducteur bobine	Cuivre	B15	FIXED STATOR	16
SSA_16	Conducteur bobine	Cuivre	B16	FIXED STATOR	16
SSA_17	Conducteur bobine	Cuivre	B17	FIXED STATOR	16
SSA_18	Conducteur bobine	Cuivre	B18	FIXED STATOR	16
SSA_19	Conducteur bobine	Cuivre	B19	FIXED STATOR	16
SSA_20	Conducteur bobine	Cuivre	B20	FIXED STATOR	16
SSB_1	Conducteur bobine	Cuivre	B21	FIXED STATOR	16
SSB_2	Conducteur bobine	Cuivre	B22	FIXED STATOR	16
SSB_3	Conducteur bobine	Cuivre	B23	FIXED STATOR	16
SSB_4	Conducteur bobine	Cuivre	B24	FIXED STATOR	16

# Annexes

SSB_5	Conducteur bobine	Cuivre	B25	FIXED STATOR	16
SSB_6	Conducteur bobine	Cuivre	B26	FIXED STATOR	16
SSB_7	Conducteur bobine	Cuivre	B27	FIXED STATOR	16
SSB_8	Conducteur bobine	Cuivre	B28	FIXED STATOR	16
SSB_9	Conducteur bobine	Cuivre	B29	FIXED STATOR	16
SSB_10	Conducteur bobine	Cuivre	B30	FIXED STATOR	16
SSB_11	Conducteur bobine	Cuivre	B31	FIXED STATOR	16
SSB_12	Conducteur bobine	Cuivre	B32	FIXED STATOR	16
SSB_13	Conducteur bobine	Cuivre	B33	FIXED STATOR	16
SSB_14	Conducteur bobine	Cuivre	B34	FIXED STATOR	16
SSB_15	Conducteur bobine	Cuivre	B35	FIXED STATOR	16
SSB_16	Conducteur bobine	Cuivre	B36	FIXED STATOR	16
SSB_17	Conducteur bobine	Cuivre	B37	FIXED STATOR	16
SSB_18	Conducteur bobine	Cuivre	B38	FIXED STATOR	16
SSB_19	Conducteur bobine	Cuivre	B39	FIXED STATOR	16
SSB_20	Conducteur bobine	Cuivre	B40	FIXED STATOR	16
SSC_1	Conducteur bobine	Cuivre	B41	FIXED STATOR	16
SSC_2	Conducteur bobine	Cuivre	B42	FIXED STATOR	16
SSC_3	Conducteur bobine	Cuivre	B43	FIXED STATOR	16
SSC_4	Conducteur bobine	Cuivre	B44	FIXED STATOR	16
SSC_5	Conducteur bobine	Cuivre	B45	FIXED STATOR	16
SSC_6	Conducteur bobine	Cuivre	B46	FIXED STATOR	16
SSC_7	Conducteur bobine	Cuivre	B47	FIXED STATOR	16
SSC_8	Conducteur bobine	Cuivre	B48	FIXED STATOR	16
SSC_9	Conducteur bobine	Cuivre	B49	FIXED STATOR	16
SSC_10	Conducteur bobine	Cuivre	B50	FIXED STATOR	16
SSC_11	Conducteur bobine	Cuivre	B51	FIXED STATOR	16
SSC_12	Conducteur bobine	Cuivre	B52	FIXED STATOR	16

# Annexes

SSC_13	Conducteur bobine	Cuivre	B53	FIXED STATOR	16
SSC_14	Conducteur bobine	Cuivre	B54	FIXED STATOR	16
SSC_15	Conducteur bobine	Cuivre	B55	FIXED STATOR	16
SSC_16	Conducteur bobine	Cuivre	B56	FIXED STATOR	16
SSC_17	Conducteur bobine	Cuivre	B57	FIXED STATOR	16
SSC_18	Conducteur bobine	Cuivre	B58	FIXED STATOR	16
SSC_19	Conducteur bobine	Cuivre	B59	FIXED STATOR	16
SSC_20	Conducteur bobine	Cuivre	B60	FIXED STATOR	16

## 2. Rotorique

région	Type de région	Matériau de région	Composant électrique de région	Ensemble mécanique	Nombre de spire du conducteur
RRA_1	Conducteur bobine	Cuivre	B60	FIXED STATOR	12
RRA_2	Conducteur bobine	Cuivre	B61	FIXED STATOR	12
RRA_3	Conducteur bobine	Cuivre	B62	FIXED STATOR	12
RRA_4	Conducteur bobine	Cuivre	B63	FIXED STATOR	12
RRA_5	Conducteur bobine	Cuivre	B64	FIXED STATOR	12
RRA_6	Conducteur bobine	Cuivre	B65	FIXED STATOR	12
RRA_7	Conducteur bobine	Cuivre	B66	FIXED STATOR	12
RRA_8	Conducteur bobine	Cuivre	B67	FIXED STATOR	12
RRA_9	Conducteur bobine	Cuivre	B68	FIXED STATOR	12
RRA_10	Conducteur bobine	Cuivre	B69	FIXED STATOR	12
RRA_11	Conducteur bobine	Cuivre	B70	FIXED STATOR	12
RRA_12	Conducteur bobine	Cuivre	B71	FIXED STATOR	12
RRA_13	Conducteur bobine	Cuivre	B72	FIXED STATOR	12
RRA_14	Conducteur bobine	Cuivre	B73	FIXED STATOR	12
RRA_15	Conducteur bobine	Cuivre	B74	FIXED STATOR	12
RRA_16	Conducteur bobine	Cuivre	B75	FIXED STATOR	12
RRB_1	Conducteur bobine	Cuivre	B76	FIXED STATOR	12
RRB_2	Conducteur bobine	Cuivre	B77	FIXED STATOR	12
RRB_3	Conducteur bobine	Cuivre	B78	FIXED STATOR	12
RRB_4	Conducteur bobine	Cuivre	B79	FIXED STATOR	12
RRB_5	Conducteur bobine	Cuivre	B80	FIXED STATOR	12
RRB_6	Conducteur bobine	Cuivre	B81	FIXED STATOR	12
RRB_7	Conducteur bobine	Cuivre	B82	FIXED STATOR	12
RRB_8	Conducteur bobine	Cuivre	B83	FIXED STATOR	12
RRB_9	Conducteur bobine	Cuivre	B84	FIXED STATOR	12
RRB_10	Conducteur bobine	Cuivre	B85	FIXED STATOR	12
RRB_11	Conducteur bobine	Cuivre	B86	FIXED STATOR	12

# Annexes

RRB_12	Conducteur bobine	Cuivre	B87	FIXED STATOR	12
RRB_13	Conducteur bobine	Cuivre	B88	FIXED STATOR	12
RRB_14	Conducteur bobine	Cuivre	B89	FIXED STATOR	12
RRB_15	Conducteur bobine	Cuivre	B90	FIXED STATOR	12
RRB_16	Conducteur bobine	Cuivre	B91	FIXED STATOR	12
RRC_1	Conducteur bobine	Cuivre	B92	FIXED STATOR	12
RRC_2	Conducteur bobine	Cuivre	B93	FIXED STATOR	12
RRC_3	Conducteur bobine	Cuivre	B94	FIXED STATOR	12
RRC_4	Conducteur bobine	Cuivre	B95	FIXED STATOR	12
RRC_5	Conducteur bobine	Cuivre	B96	FIXED STATOR	12
RRC_6	Conducteur bobine	Cuivre	B97	FIXED STATOR	12
RRC_7	Conducteur bobine	Cuivre	B98	FIXED STATOR	12
RRC_8	Conducteur bobine	Cuivre	B99	FIXED STATOR	12
RRC_9	Conducteur bobine	Cuivre	B100	FIXED STATOR	12
RRC_10	Conducteur bobine	Cuivre	B101	FIXED STATOR	12
RRC_11	Conducteur bobine	Cuivre	B102	FIXED STATOR	12
RRC_12	Conducteur bobine	Cuivre	B103	FIXED STATOR	12
RRC_13	Conducteur bobine	Cuivre	B104	FIXED STATOR	12
RRC_14	Conducteur bobine	Cuivre	B105	FIXED STATOR	12
RRC_15	Conducteur bobine	Cuivre	B106	FIXED STATOR	12
RRC_16	Conducteur bobine	Cuivre	B107	FIXED STATOR	12

## Paramètre électrique

### 3. Storique

Resistance statorique les tête d'bobinage	Resistance statorique de bobinage	Inductance statorique
R1 R2 R3	B1 B2..... B60	L 1 L2 L 3
0.1624	0.3136	0.0956

### 1. Rotorique

Resistance statorique les tête d'bobinage	Resistance statorique de bobinage	Inductance statorique
R4 R5 R6	B61 B62..... B108	L 1 L2 L 3
0.0659	0.10752	0.00448

## Les Ensemble mécanique

Régine	Type de Régine	Matériau de région	Ensemble mécanique
STATOR	Région magnétique no conductrice	FER (M600-50A acier au silicium)	Fix stator
Rotor	Région magnétique no conductrice	FER (M600-50A acier au silicium)	Rotation

# Annexes

## Tension d'alimentation

Source de tentions	Valeur de tentions
V1	$220 \cdot \text{Sqrt}(2) \cdot \text{Sin}(2 \cdot \text{PI} \cdot 50 \cdot \text{TIME})$
V2	$220 \cdot \text{Sqrt}(2) \cdot \text{Sin}(2 \cdot \text{PI} \cdot 50 \cdot \text{TIME} - (2 \cdot \text{PI})/3)$
V3	$220 \cdot \text{Sqrt}(2) \cdot \text{Sin}(2 \cdot \text{PI} \cdot 50 \cdot \text{TIME} + (2 \cdot \text{PI})/3)$

## Transformée de Fourier rapide (FFT) :

Considérons le signal  $X(t)$  a temps continu. Si  $X$  est a énergie finie, sa transformée de Fourier a la fréquence  $f$  est la suivante [ORA 88].

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-2\pi f t} dt$$

Son inverse est donné par :

$$X(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(f) e^{-2\pi f t} df$$

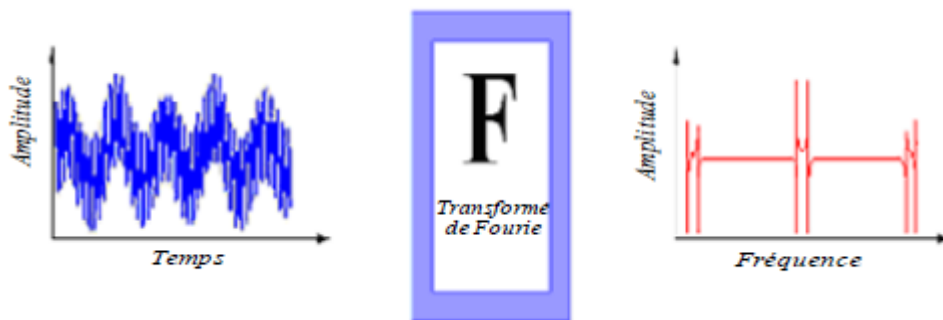


FIGURE 4-2. REPRESENTATION TEMPORELLE VERS FREQUENTIELLE

Sa transformée de Fourier discrète de N points avec une période d'échantillonnage T est donné par :

$$x\left(\frac{f}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{K=0}^{K=N-1} x(KT) e^{\frac{2\pi fKT}{NT}}$$

Et sa relation inverse est donné par :

$$x(KT) = \frac{1}{N} \sum_{K=0}^{K=N-1} x\left(\frac{f}{NT}\right) e^{-j\frac{2\pi fKT}{NT}}$$

La transformée de Fourier rapide (FFT) est un algorithme de calcul rapide de la transformée de Fourier discrète. L'algorithme de base de cette transformée utilise un nombre

# Annexes

de point  $N$  égal à une puissance de 2, ce qui permet d'obtenir un gain en temps de calcul, par rapport à un calcul avec la transformée de Fourier discrète, de  $\frac{N}{\log_2(N)}$

Cette transformation fait clairement ressortir le contenu fréquentiel du signal  $x(t)$ . En effet, la FFT décompose le signal  $x(t)$  sur une base de vecteurs propres sinusoidaux  $\{e^{2\pi f k T}\}_{f \in R}$

Malheureusement, ceci convient pour des signaux stationnaires dont les propriétés statistiques sont invariantes dans le temps. Cependant, en pratique la grande majorité des signaux rencontrés sont non stationnaires et la notion de décomposition sur une somme infinie d'exponentielles complexes propres à la FFT s'avère inadéquate.

Pour mieux décrire ce type de signaux, on fait appel à des représentations faisant intervenir conjointement le temps et la fréquence. Le changement ainsi opéré nous permettra d'analyser les lois du comportement fréquentielle du signal au cours du temps. Dans le cas de l'existence de sauts d'impulsions ou de changement de fréquence par exemple, la FFT ne permet pas de localiser ces événements transitoires qui surviennent dans le signal [39], [40]. Ces phénomènes sont non stationnaires et du fait qu'ils sont brefs et souvent à caractère oscillatoire. Leur contenu spectral est difficile à mettre en évidence.

Pour résoudre ce problème, GABOR (1964) a introduit la transformée de Fourier à court terme qui se base sur le fenêtrage (*Windowing*). il s'agit de segmenter en tranches de temps fixes le signal à analyser et d'appliquer par la suite la transformée de Fourier à chaque tranche. la suite logique pour la résolution de ce problème a été l'élaboration d'un puissant outil localisé en temps et en fréquence dénommé la transformée en ondelettes (*wavelets transform*).

# Bibliographie

[1] : Belkacem, T. O. U. A. L. (2010). *Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable* (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).

[2] : Vidal, P. É. (2004). *Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation* (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse).

[3]: Dendouga, A. (2010). *Contrôle des puissances actives et réactives de la machine à double alimentation (DFIM)* (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).

[4] : Abdessemed, R. (2011). *Modélisation et simulation des machines électriques*. Ellipses. p.141-142.

[5] : Youcef, B. (2010). *Etude et commande du moteur asynchrone à double alimentation (MADA) par différentes techniques avancées* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Lakhdar Ben Amara dit Hamma Lakhdar d'El Oued).

[6] : Mouloud, B. (2012). *Etude d'un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable: application sur un site à Tindouf* (Doctoral dissertation, Université M'hamed Bougara de Boumerdès).

[7] : Amine, H. M. (2012). *Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques* (Doctoral dissertation, Université Ferhat Abbas de Sétif 1).

[8] : Abderrahim, I. (2015). *Amélioration de la qualité d'énergie d'un système de conversion d'énergie éolienne à base de machine asynchrone à double alimentation et connecté au réseau électrique* (Doctoral dissertation, École de technologie supérieure).

[9] : Riyadh, R. O. U. A. B. H. I. (2012). *Étude et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Application : Energie éolienne* (Doctoral dissertation, Université Ferhat Abbas de Sétif 1).

[10] : Salloum, G. (2007). *Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation* (Doctoral dissertation, Toulouse, INPT).

[11] : Guy ,S, Francis NOTELET, « *Electrotechnique industrielle* ». Edition Lavoisier,2006.

[12]:Khojet El Khil, S. (2006). *Commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA): optimisation des pertes dans les convertisseurs: reconfiguration de la commande pour un fonctionnement sécurisé* (Doctoral dissertation,Toulouse, INPT).



# Bibliographie

[13] : Poitiers, F. (2003). *Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-machine asynchrone a cage autonome-machine asynchrone a double alimentation reliée au réseau* (Doctoral dissertation, Université de Nantes).

[14] : El Mahdi, A. S. A. (2010). *Commande en vitesse par mode glissant d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation*.

[15] : Houaria, A. (2011). *Commande par mode de glissement d'une machine asynchrone à double alimentation* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf des sciences et de la technologie d'Oran).

[16]: Hopfensperger, B., Atkinson, D. J., &Lakin, R. A. (1999). *Stator flux oriented control of a cascaded doubly-fed induction machine*. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 146(6), 597-605.

[17]: Hopfensperger, B., Atkinson, D. J., &Lakin, R. A. (2000). *Stator-flux-oriented control of a doubly-fed induction machine with and without position encoder*. IEE Proceedings-Electric power applications, 147(4), 241-250.

[18] : Benalia, L. (2010). *Commande en tension des moteurs à induction double alimentés* (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).

[19] : Bennani, H. (2011). *Machine asynchrone à double alimentation : les lois de commande en régime permanent* (Doctoral dissertation, Université Laval).

[20] : Ayoub, T. (2013). *Analyse et commande quatre quadrants de la machine asynchrone à double alimentation* (Doctoral dissertation, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue).

[21] : Serhoud, H. (2015). *Contribution à la Commande Robuste de la Machine Asynchrone sans Balais à Double Alimentations* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).

[22] : ROUABHI, R. (2016). *Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée* (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).

[23] : Bennouna, O « *diagnostic des systèmes linéaires dynamiques application à un système à énergie renouvelable de type éolien* », Mémoire de doctorat. CORSE 2006.

[24] : Aimer, A « *Emploi de la représentation temps-fréquence dans le diagnostic des défauts des machines asynchrones à cage* » Mémoire de magister, université d'Oran 2010.

[25] : Ondel, O, « *Diagnostic par reconnaissance des formes : application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone* », Thèse de Doctorat d'Etat. Ecole Centrale de Lille 2006.

# Bibliographie

[26] : Brahim.A « *Contribution au diagnostic de machines électromécaniques : Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée* » thèse de doctorat, université de Saint Ettien mars 2009.

[27] : Dedier.G « *Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances* » thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, 2004.

[28] Cameron and al.G.R.R "Vibration and Current Monitoring for Detecting Airgap eccentricity in Large Induction Motors", I EE Proceedings, Vol. 133, Pt. B, No. 3, May 1986, pp. 155-163.

[29] :Caryn M. Riley, Student Member, IEEE, Brian K. Lin, Thomas G. Habetler, Senior Member, IEEE and Randy R. Schoen, Member, IEEE, "A Method for Sensorless On-Line Vibration Monitoring of Induction Machines", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 34, No. 6, Nov./Dec. 1998.

[30] :Sahraoui .M "Contribution aux diagnostics des machines asynchrones triphasées à cage," Mémoire de Magistère, Université Mohamed Khider, Biskra, Décembre 2003.

[31] : Khatir..A Etude comparative des modèles des machines asynchrones utilisés en diagnostic des défauts Thèse de Magister Université Ferhat Abbas de Sétif Algérie 2009.

[32] :Hsu.J.S "Monitoring of Defects in Induction Motors Through Air-Gap Torque Observation", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No.5, Sept./Oct. 1995, pp. 1016-1021.

[33] :Maier.R "Protection of Squirrel-Cage Motor Utilizing Instantaneous Power and Phase Information", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 2, March April 1992, pp. 376-380.

[34] :Legowski, A and al .S.E "Instantaneous Power as Medium for the Signature Analysis of Induction Motors". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 32, No.4, July August 1996, pp. 904-909.

[35] : Ghoggal .A "Diagnostic de la machine asynchrone triphasée : modèle dédié à la détection des défauts." Thèse de Magistère, Université de Batna, Algérie, May 2005.

[36] : Sahraoui.M" Etude comparative des méthodes de diagnostic des machines asynchrones," Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Déc. 2010.

[37] : Menacer.M"Contribution à l'identification des paramètres et des états d'une machine à induction pour diagnostic et développement de commande robuste: robustesse vis-à-vis de défauts", Thèse de doctorat, Université de Batna, Décembre 2007.

# Bibliographie

[38] : jung.L, "System identification: Theory for the user", 2nd ed., PTR Prentice Hall Saddle River, N.J., 1999

[39]: Cusido, L. Romeral, J. A. Ortega, J. A. Rosero, A. Garcia, "Fault detection in induction machines using power spectral density in wavelet decomposition," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 2, pp. 633-643. Feb. 2008

[40] : Kia.S.H Henao. H.G. A. Capolino, "Diagnosis of broken-bar fault in induction machines using discrete wavelet transform without slip estimation," IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 45, No. 4, pp. 107–121, Jul Aug. 2009.

[41] : Gojko M. Joksimovic, J. Riger, T. M. Wolbank, Nedjeljko Peric, Mario Vasak "Stator-Current Spectrum Signature of Healthy Cage Rotor Induction Machines", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, N°9, PP. 4025-4033, 2013.

[42] : Sabonnadière, J. C . Coulomb, J. L "Calcul des Champs Electromagnétiques", Techniques de l'Ingénieur, D3020.

[43] : Casimir.G, E. Bouteleux, H. Yahoui, G. Clerc, H. Henao, C. Delmotte, G. A.Capolino, G. Rostaing, J. P. Rognon, E. Foulon, L. Loron, H. Razik, G. Didier, G.Houdouin, G. Barakat, B. Dakyo, S. Bachir, S. Tnani, G. Champenois, J. C.Trigeassou, V. Devanneaux , B. Dagues, and J. Faucher.Comparaison de plusieurs méthodes de modélisation de la machine asynchrone en présence de défauts. *Electrotechnique du Futur*, Décembre 2003 .

[44] : Schaeffer.E *Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 1999.

[45] : KHELIF. S ,«Modélisation Des Machines Asynchrones en Vue du Diagnostic Prise en Compte Adéquate du Circuit Magnétique»

[46] : Sprooten . J «*Finite element and electrical circuit modeling of faulty induction machines - study of internal effects and fault detection techniques*» thèse de doctorat, Université libre de Bruxelles 2007

[47] : Khelif. S. «*Modélisation de la machine asynchrone en vue diagnostic prise en compte adéquate du circuit magnétique* », mémoire de magistère, Electrotechnique Université de Mohammed Khaider Biskra, 2012

[48] : Halem, N. « Modélisation des Machines Asynchrones en vue du Diagnostic par Eléments

# Bibliographie

[49]: Goldemberg, J., T. B. Johansson, D. Anderson, P. United Nations Development, E. United Nations. Dept. of, A. Social, *et al.*, *World Energy Assessment: Overview : 2004 Update*: United Nations Development Programme, Bureau for Development Policy, 2004.

[50] : Ifedi, C. J. "A high torque density, direct drive in-wheel motor for electric vehicles," Ph.D., School of Electrical and Electronic Engineering, Newcastle University, 2013.

[51]: Ruviano, M. F. Runcos, N. Sadowski, and I. M. Borges, "Analysis and Test Results of a Brushless Doubly Fed Induction Machine With Rotary Transformer," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 59, pp. 2670-2677, 2012

[52] : Wu, L. S., Tian, and S. Cui, "A comparative study of the interior permanent magnet electrical machine's rotor configurations for a single shaft hybrid electric bus," in *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC'08. IEEE, 2008*, pp. 1-4.

[53] : Choe, Y.-Y., S.-Y. Oh, S.-H. Ham, I.-S. Jang, S.-Y. Cho, J. Lee, *et al.*, "Comparison of Concentrated and Distributed Winding in an IPMSM for Vehicle Traction," *Energy Procedia*, vol. 14, pp. 1368-1373, // 2012. D. P. Kothari, *Electric Machines (Sigma)*: McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited, 2006.

[54] : Kothari, D. P., *Electric Machines (Sigma)*: McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited, 2006.

[55] : Baker, N. J. "Linear generators for direct drive marine renewable energy converters," Durham University, 2003.

[56] livre, Richter, R., *Elektrische Maschinen*, 1954.

# Bibliographie