

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Filière Electrotechnique

Spécialité Machine Electrique

présenté par

**DEGHMANE REDA**

**&**

**MEZIANI WALID**

# Modélisation et diagnostic d'une MADA AVEC DESEQUILIBRE D'ALIMENTATION

Proposé par : Dr.D.KOUCHIH

Année Universitaire 2019-2020

## 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 Dr D.KOUCHIH pour m'avoir constamment guidé tout long de mon projet et pour les précieux conseils qu'il m'ont donnés, et pour leur serviabilité, leur disponibilité et leur conseil constructif.

Je tiens à remercier, les examinateurs pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant 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 2eme année Master de la spécialité de génie électrique spécifiquement machines électriques.

En fin on n'oublie pas toute personne ayant participé de près ou de loin à réaliser ce travail, et toutes personnes dont nous avons oublié de citer.

## **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 MEZIANI.*

*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.*

**M.WALID**

## 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 Ardues.*

*A mes frères **Moos Adel Ahlem***

*A toute la famille*

**DEGHEMANE ET**

**BETTACHE** A mes tantes et  
*mes oncles.*

Et à tous mes amis sans oublier **slimane, cosco , anis ,El hadj  
,moh ,saddik ,zaki ,monaim ,Oussama et ghribi...**

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

**D.REDA**

## ملخص:

يندرج عملنا هذا في تشخيص الأخطاء في الآلات الكهربائية غير المتزامنة ذات تغذية مزدوجة الغرض من هذا هو الحفاظ على المحرك و صيانتته من أجل تمديد مدة خدماته وتحسين أدائه و مردوده و تقييم خلل في عدم توازن الجهد.

استخدمنا طريقة العناصر المحددة لمحاكاة المحرك بواسطة برنامج Flux 2D,

وإجراء كشف للأخطاء عن طريق تقنية (تحويل فورييه السريع)

كلمات المفاتيح:

العناصر الآلة الكهربائية غير المتزامنة ذات تغذية مزدوجة ,خلل في عدم توازن الجهد , تحويل فورييه السريع,المحددة

**Résumé :** Notre travaille est sur le diagnostique des défauts dans les machines électriques asynchrone à double alimentation, dans le but de préserver la duré de vie de la machine au cas d'un déséquilibre de tension.

Nous avons utilisé la méthode d'élément finis à l'aide du logiciel Flux 2D, et le technique FFT pour la détection des défauts.

**Mots clés :** machine asynchrone à double alimentation, éléments finis ,transformation de furies rapide

**Abstract :** This work focuses on the diagnosis of faults in the doubly fed induction machine (DFIM),to protect the machine in case of a voltage drop in one phase.

In our these we used Flux-2D which is base on the finite element method, and a spectrum analysis bye the FFT technique (Fast Fourier Transform) for the detection of defaults.

**Keywords :** double feed induction machine; finite elements ; Fast Fourier Transform.

## Introduction générale

### Chapitre 01 : Généralités SUR LA MADA

1.1 Introduction .....	1
1.2 Machine asynchrone à double alimentation .....	1
1.2.1 Description de la machine asynchrone à double alimentation.....	1
1.2.2 Structure de la MADA [2] .....	2
1.2.2.1 MADA à rotor bobiné.....	2
1.2.2.2 MADA sans balais.....	3
1.2.2.3 MADA en cascade .....	3
1.3 Classification des machines a doublé alimentation (MADA).....	4
1.4 Le principe de fonctionnement de la MADA .....	5
1.5 Mode de fonctionnement .....	7
1.5.1 Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA .....	7
1.5.2 Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone.....	8
1.5.3 Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone .....	8
1.5.4 Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone .....	9
1.5.5 Fonctionnement en mode génératrice hyper-synchrone.....	9
1.6 Aperçus sur les configurations de la MADA à rotor bobiné .....	10
1.6.1 Configuration pour application moteur .....	11
1.6.2 Stator alimenté par le réseau, rotor alimenté par un onduleur.....	11
1.6.3 Stator relié au réseau, rotor alimenté par un Cycloconvertisseur .....	11
1.6.4 Stator alimenté par onduleur, rotor alimenté par onduleur .....	12
1.6.5 Configuration pour application génératrice.....	12
1.6.6 MADA à énergie rotorique dissipée .....	13
1.6.6.1 Machine asynchrone à double alimentation - structure de Kramer .....	13

1.6.6.2 Machine asynchrone à double alimentation structure de Scherbius avec	
	Cycloconvertisseur.....14
1.6.6.3 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec	
	Convertisseur MLI.....15
1.7 Avantages et inconvénients de la MADA.....	16
1.7.1 Avantages de la MADA .....	16
1.7.2 Inconvénients de la MADA.....	16
1.8 Domaines d'application de la MADA.....	17
1.9 Défaillances dans les machines asynchrones.....	17
1.9.1 Cause des défauts.....	17
1.9.2 Classification des défauts.....	18
1.10 Présentation des défauts.....	19
1.10.1 Défauts affectant le stator .....	19
1.10.2 Défauts affectant le rotor .....	20
1.10.2.1 Rotor à cage d'écureuil .....	20
1.10.2.2 Défaut de rupture de barres ou d'anneau de la cage rotorique .....	20
1.10.3 Défaut de roulements.....	21
1.10.4 Défauts d'excentricités.....	21
1.10.4.1 L'excentricité statique.....	21
1.10.4.2 L'excentricité dynamique.....	21
1.11 Rotor bobiné.....	22
1.11.1 Défaut de courts-circuits.....	22
1.11.2 Défaut de contact balai – bague.....	22
1.12 Méthodes de diagnostic utilisées pour détecter les défauts de la machine .....	22
1.12.1 Méthodes sans modèle .....	22
1.12.1.1 Diagnostic par analyse des vibrations mécaniques.....	23
1.12.1.2 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique.....	24
1.12.1.3 Diagnostic par analyse du courant statorique.....	24
1.12.1.4 Diagnostic par analyse du vecteur de Park.....	24

1.12.1.5 Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle AI.....	25
1.13 Traitement de signaux .....	25
1.13.1 Analyse spectrale.....	25
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

## **CHAPITRE 02 : Modélisation de la MADA par la méthode d'élément finis**

2.1 Introduction.....	28
2.2 Méthodes de modélisation de la machine asynchrone double alimentation.....	28
2.2.1 Méthode des réseaux de perméance .....	29
2.2.2 Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés.....	29
2.2.3 Modélisation analytique par CEMC (CEMC-A) .....	30
2.2.4 Méthode des éléments finis .....	31
2.2.4.1 le principe.....	31
2.3 Les avantages et les inconvénients de la méthode éléments finis .....	32
2.3.1 Avantages de la méthode des éléments finis.....	32
2.3.2 Inconvénients de la méthode des éléments finis.....	32
2.4 Les équations de Maxwell .....	33
2.5 Le modèle employé.....	35
2.5.1 Le mode magnétostatique .....	35
2.5.2 Le mode magnétodynamique .....	36
2.5.3 Le mode magnétique transitoire.....	36
2.6 Logiciel de résolution.....	36
2.6.1 Structure du FLUX 2D .....	37
2.6.2 Procédure de construction du modèle par FLUX2D.....	40



2.7 Structure du circuit magnétique de la machine.....	42
2.8 Génération de maillage .....	43
2.9 Création des matériaux.....	44
2.10 Circuit électrique .....	45
2.11 Structure de bobinage.....	46
2.12 Conclusion.....	47

## **Chapitre 03 : Simulation de MADA**

3.1 Simulation de la MADA à l'état sain.....	48
3.2 Résultats de simulation de la MADA (machine saine) .....	48
3.2.1 Interprétation des Résultats à vide.....	51
3.2.2 Fonctionnement en charge.....	51
3.2.3 Résultats expérimentales à l'état sain en charge .....	53
3.3 Résultat du Simulation de la MADA à l'état déséquilibres de tension $V_1=180V$ .....	53
3.3.1 Interprétation des résultats.....	56
3.3.2 Fonctionnement en charge on déséquilibre .....	56
3.3.3 Interprétation Déséquilibre en charge .....	57
3.4 Résultat de l'analyse spectrale par FFT à l'état sain.....	57
3.5 Résultat de l'analyse spectrale par FFT à l'état déséquilibré .....	58
3.6 Interprétation de l'analyse spectrale.....	59
3.7 Conclusion .....	60

<b>Conclusion générale.....</b>	<b>61</b>
---------------------------------	-----------

<b>Bibliographie .....</b>	<b>62</b>
----------------------------	-----------

## Liste des Figures

---

**Figure 1.1.** Symbole D'une Machine Asynchrone A Double Alimentation (MADA)

**Figure 1.2.** Coupe d'une machine asynchrone à rotor bobine (standard)

Figure 1.3. Schéma du rotor de la MADA a Rotor Bobine

Figure 1.4. Structure de la MADA sans balais

**Figure1.5.** structure en cascade de deux machines asynchrones

**Figure 1.6.** Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.

**Figure 1.7.** Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.

**Figure 1.8** Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.

**Figure 1.9** Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone.

**Figure 1.10** Modes de fonctionnement de la MADA.

**Figure 1.11.**Schéma de la MADA dont le rotor est alimente par un onduleur

**Figure 1.12.**Schéma de la MADA dont le rotor alimente par un cycloconvertisseur [3]

**Figure 1-13.**Schéma synoptique pour l'alimentation par deux cycloconvertisseur[3]

**Figure 1.14.** MADA à énergie rotorique dissipée

**Figure 1-15.** Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique

**Figure 1.16.** MADA, structure Kramer

**Figure 1-17.**structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

**Figure 1.18.** Structure Kramer Effet de la variation dans le temps

**Figure 1.19.**Schéma général de principe de deux MADA montées en cascade

**Figure 1.20.**MADA fonctionnant en moteur a vitesse variable hautes performances

**Figure 1.21.**Causes internes de défauts de la machine asynchrone

**Figure 1.22.**Causes *externes* de défauts de la machine asynchrone

**Figure 1.23.**représentation des différents défauts statorique possibles

## Liste des Figures

---

**Figure 1.24.** Représentation de l'excentricité statique et dynamique

**Figure 2.1.** Schéma électrique équivalente de la cage rotorique.

**Figure 2.2.** Fonction d'interpolation d'un élément

**Figure 2.3.** Figure de logiciel flux2D

**Figure 2.4.** Figure de Construction d'un projet Flux (2D/3D)

**Figure 2.5.** Schéma des différents modules du logiciel Flux-2D

**Figure 2.6.** Structure de la géométrie de la MADA

**Figure 2.7.** Structure de les slote statorique

**Figure 2.8.** Structure de les slote rotorique

**Figure 2.9.** l'entrefer

**Figure 2.10.** Répartition du maillage triangulaire dans la géométrie

**Figure 2.11.** Circuit couple avec le modèle fe

**Figure 2.12** Bobinage triphasé représente deux pas polaires lus

**Figure 3.1.** Figure d'induction b vide en régime permanent

**Figure 3.2.** Vitesse de rotation de la machine a l'état sain a vide

**Figure 3.3.** Couple électromagnétique de la machine sain à vide

**Figure 3.4.** Tension d'alimentation équilibré

**Figure 3.5.** Forme d'onde du courant statorique a vide a l'état sain

**Figure 3.6.** Vitesse de rotation de la machine a l'état sain en charge de 10nm

**Figure 3.7.** Couple électromagnétique de la machine sain en charge

**Figure 3.8.** Forme d'onde du courant statorique a l'état sain en charge de 10nm

**Figure 3.9.** L'induction à vide a l'état déséquilibrée

**Figure 3.10.** La vitesse de rotation de la machine a l'état déséquilibrée a vide

## Liste des Figures

---

**Figure 3.11.** Tension d'alimentation déséquilibré

**Figure 3.12.** Couple électromagnétique de la machine al 'état déséquilibrée a vide

**Figure 3.13.** La vitesse de rotation de la machine a l'état déséquilibrée en charge

**Figure 3.14.** Couple électromagnétique de la machine al 'état déséquilibrée en charge

**Figure 3.15.** Représentation les courants statorique de la machine l'état déséquilibrée en charge

**Figure 3.16.** Le spectre de courant statorique en charge avec tension équilibre

**Figure 3.17.** Le spectre de courant statorique 1er phase en charge avec tension déséquilibré

**Figure 3.18.** Le spectre de courant statorique 2et 3em phase en charge avec tension déséquilibré

## Liste des tableaux

---

**Tableau 1.1.** Valeur de caractéristiques matériaux magnétiques.

## Symboles : Significations et abréviations

---

L : La longueur de conducteur.

V : La vitesse de conducteur.

B : Induction magnétique.

$F_m$  : La force mécanique.

E0 : Générateur de f.é.m.

R : Résistance interne.

I : Le courant.

Fe : Force électromagnétique.

E : Force électromotrices (f.é.m).

$\Omega$  : Domaine surfacique.

A : Potentiel magnétique.

T : Frontière de domaine.

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

$\mu_r$  : la perméabilité relative de fer.

$\varepsilon$  : Permittivité électrique

$\mu$  : Perméabilité magnétique.

J : Densité de charge.

$\rho$  : Charge électrique.

$\sigma$  : Conductivité électrique.

j : Unité imaginaire.

t : Temps.

L1,L2,L3 : Inductance de fuite des têtes des bobine statorique.

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

$R'_1$  : Résistance de conductor bobine statorique.

## **Symboles : Significations et abréviations**

---

$R_2$  : La résistance d'un file de l'enroulement rotorique .

$R'_2$  : Résistance de conducteur bobine rotorique.

$\omega_s$  : Pulsation statorique.

P : Nombre 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 harmonique d'encoches rotorique.

$f_v$  : Fréquence caractéristique de vibration.

$F_b$  : Fréquence caractéristique du défaut de barres.

$N_b$  : Nombre d'élément roulant de roulement.

$f_m$  : Fréquence de rotation de rotor.

$f_r$  : La fréquence rotorique.

$f_s$  : La fréquence statorique.

$g$  : Le glissement .

$N_r$  : Vitesse de rotation .

P : Nombre de paire de pôles.

$\omega_m$  : Vitesse angulaire de rotation de 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.

## **Symboles : Significations et abréviations**

---

$C_e$  : couple électromagnétique.

$C_r$  : couple résistant.

$J$  : Moment d'inertie des parties tournant.

MADA : Machine a doublé alimentation.

FFT : transformée de fourier rapide.

MCSA : Motor Current Signature Analyse.

MASDE : Machine Asynchrone a double étoile.

CDFM : Cascaded Doubly –Fed induction Machine.

FEM: finité Elément méthode.



# Introduction Générale

---

L'énergie électrique est utilisée depuis longtemps pour produire l'énergie mécanique grâce à des convertisseurs électromécanique qui sont les machines électrique.

La machine asynchrone reste un élément important dans le milieu industriel mais malgré ses avantages elle peut présenter des défauts structurels par des causes externes ou internes.

De nos jours, l'utilisation des moteurs à courant alternatif est de plus en plus fréquente, car ces machines sont caractérisées par leur robustesse et par leur performance, 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 .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, 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

# Introduction Générale

---

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 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

**CHAPITRE 01 :**

**Généralités sur la machine**

**asynchrone à double**

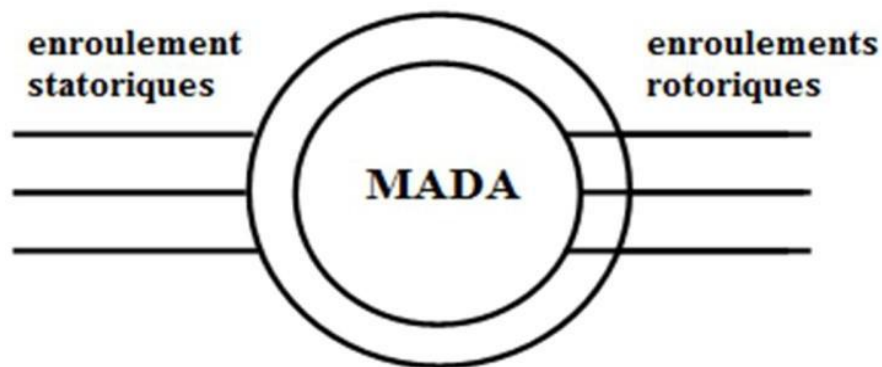
**alimentation**

## 1.1 Introduction :

La première apparition de cette machine asynchrone à double alimentation "doubly fed induction machine (DFIM) ", date de l'année 1899; il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation.

La MADA est une machine triphasée à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessibles, dans lesquels la puissance peut être fournie ou extraite de la machine à travers ces enroulements.

Ce type de machines nécessite une seule source d'alimentation alternative qui peut alimenter les deux côtés de la machine et ceci constitue un avantage principale surtout dans les domaines de l'entraînement et de la génération à vitesse variable et où le glissement de la machine à double alimentation peut être modifié au moyen de l'association des convertisseurs de puissance du côté statorique ou rotorique ou les deux à la fois. [1]



**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:

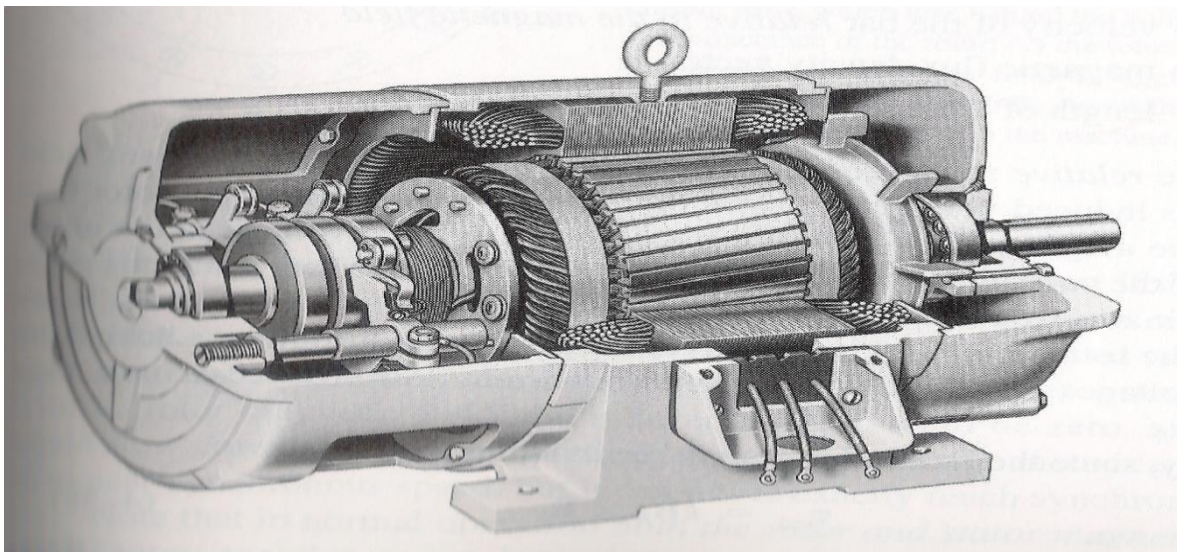
La MADA à une double accessibilité au stator et au rotor. Dans son fonctionnement, elle s'apparente au fonctionnement de la machine synchrone avec une vitesse constante du fait de l'imposition des fréquences aux deux armatures et le caractère asynchrone est lié à la Différence de

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. Les différentes variantes de la machine à double alimentation les plus attractives sont développées comme présenté ci-dessous [2]

### 1.2.2 Structure de la MADA

#### 1.2.2.1 MADA à rotor bobiné :

La figure (1.3) montre que la machine à double alimentation à rotor bobiné ou standard 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. [3]



**Figure 1.2.** Coupe d'une machine asynchrone à rotor bobine (standard)

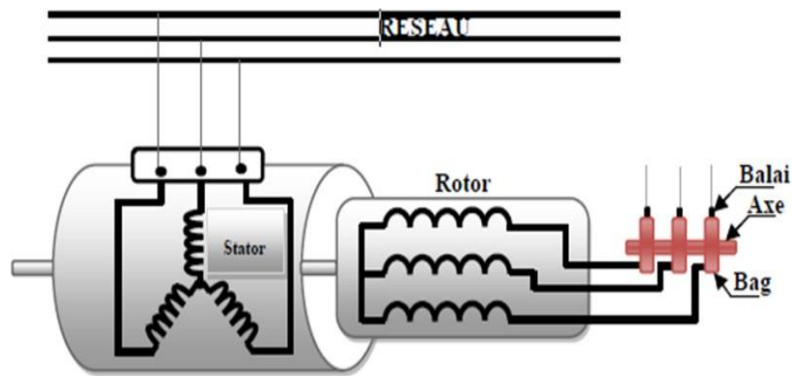


Figure 1.3. Schéma du rotor de la MADA a Rotor Bobine

**1.2.2.2 MADA sans balais :**

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

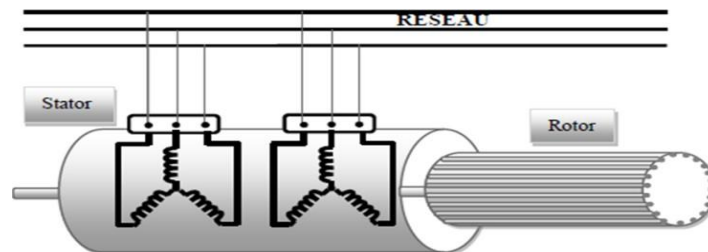
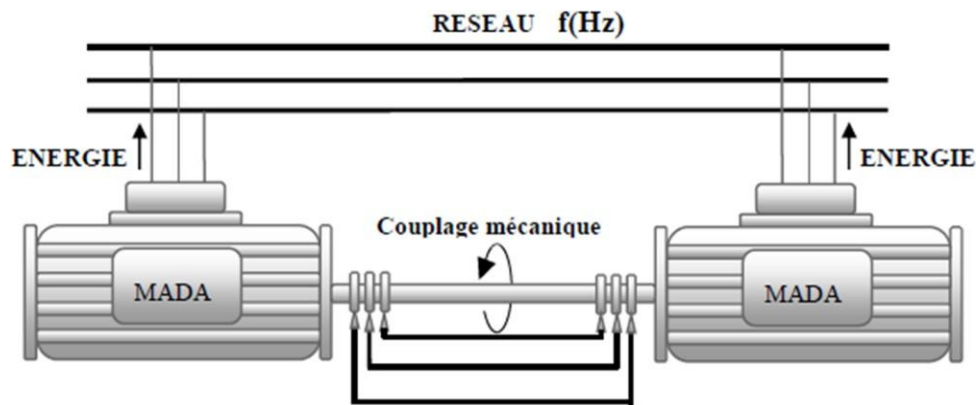


Figure 1.4. Structure de la MADA sans balais

Parmi les types les plus connus de machines à double alimentation sans balais, on trouve la machine à double alimentation à réluctance variable qui consiste en un stator identique à celui de la machine à double alimentation sans balais et un rotor basé sur le principe de la réluctance

**1.2.2.3 MADA en cascade :**

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



**Figure 1.5.** STRUCTURE EN CASCADE DE DEUX MACHINES ASYNCHRONE

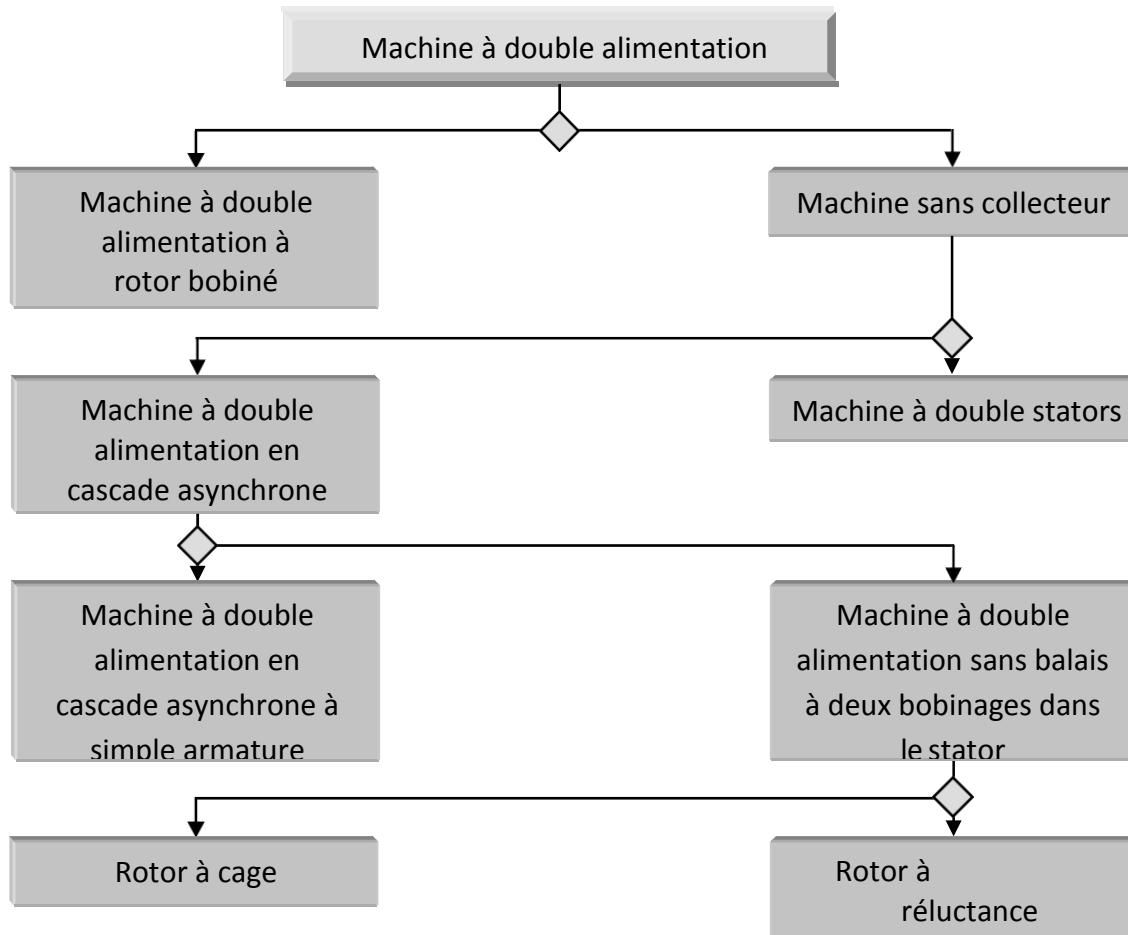
système à double alimentation coté stator. Les enroulements statorique sont reliés à deux sources de tension triphasées.

Pratiquement, il est aussi possible de combiner deux machines asynchrones à rotor bobiné dans une seule machine avec un comportement identique à celui de la machine à double alimentation en cascade asynchrone, tel que les deux enroulements des stators sont logés dans une seule armature et le rotor soit à cage d'écureuil, comme dans le cas de la machine à double alimentation sans balais.

sur le convertisseur. Cette machine fera l'objet de modélisation et de commande dans la suite de ce mémoire de thèse.

### 1.3 Classification des machines asynchrone à double alimentation

La classification de la machine asynchrone à rotor bobiné est obtenue à partir d'une recherche bibliographique qui a été développée dans la littérature du domaine des machines à double alimentation [4]



### 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, [5] la vitesse angulaire de rotation du rotor sera définie par

$$\omega_s \pm \omega_r = p\Omega_m \tag{1.1}$$

**Avec :**

$\Omega_m$  : la vitesse mécanique du rotor ;

$\omega_s$  et  $\omega_r$  : les pulsation statorique et rotorique 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 ( $w_m < w_s$ ), (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 :[7]

$$p f_m + f_r = f_s \tag{1.2}$$

Avec  $f_m$  : fréquence de rotation du rotor.

Dans ce cas le glissement est défini par :

$$G = \frac{f_r}{f_s} = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \tag{1.3}$$

D'après cette équation on peut distinguer quatre régimes de fonctionnement de la MADA [6]:

**Stationnaire (g=1)** : le stator est alimenté directement par le réseau avec une Fréquence Le circuit  $f_s$  rotorique est siège d'une force électromotrice induite avec une fréquence  $f_s$  identique à  $f_r$ . 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 du rotor va commencer à décroître. Plus la vitesse du rotor s'approche de celle 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 rotorique.

**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.

## 1.5 Mode de fonctionnement :

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 rotorique 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 [6]

### 1.5.1 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 rotorique 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 [3]

### 1.5.2 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 [4].

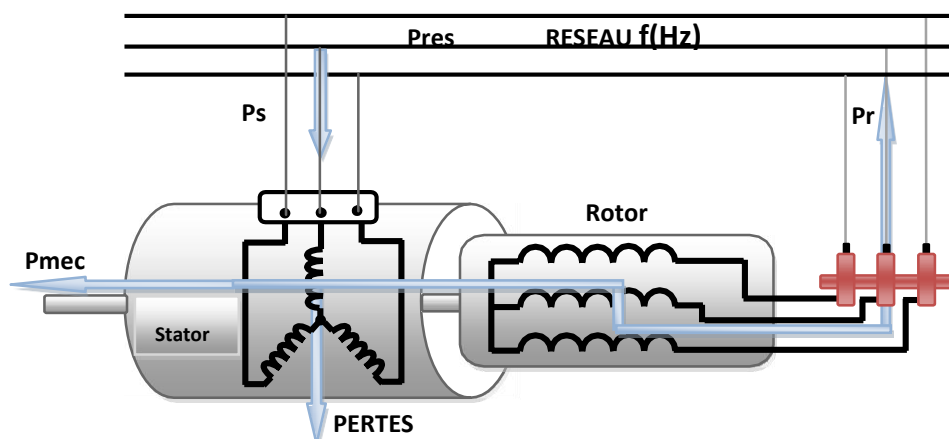


Figure1.6.Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

### 1.5.3 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 [5].

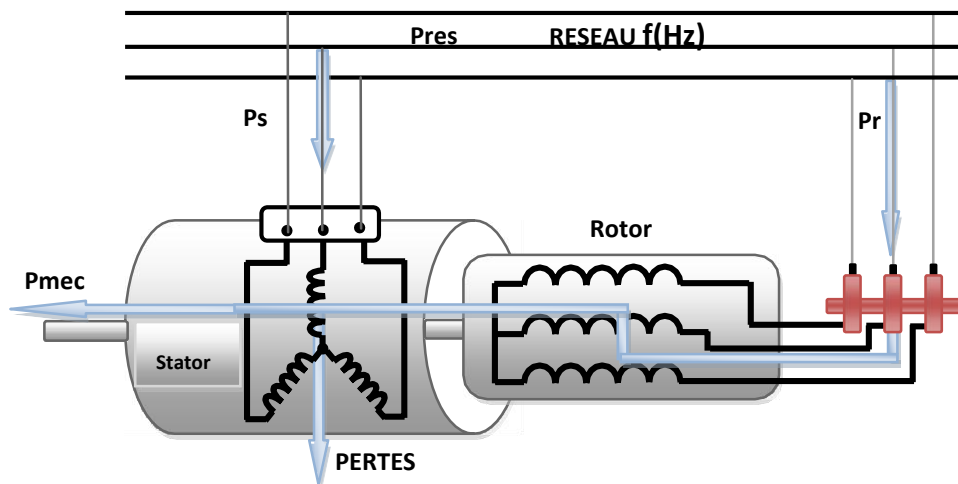


Figure 1.7. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.

### 1.5.4 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 [6].

### 1.5.5 Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone :

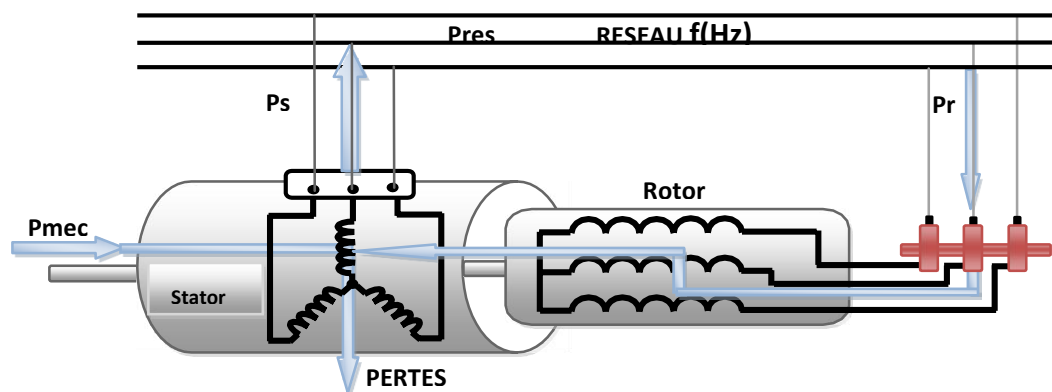


Figure 1.8 Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.

- 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]

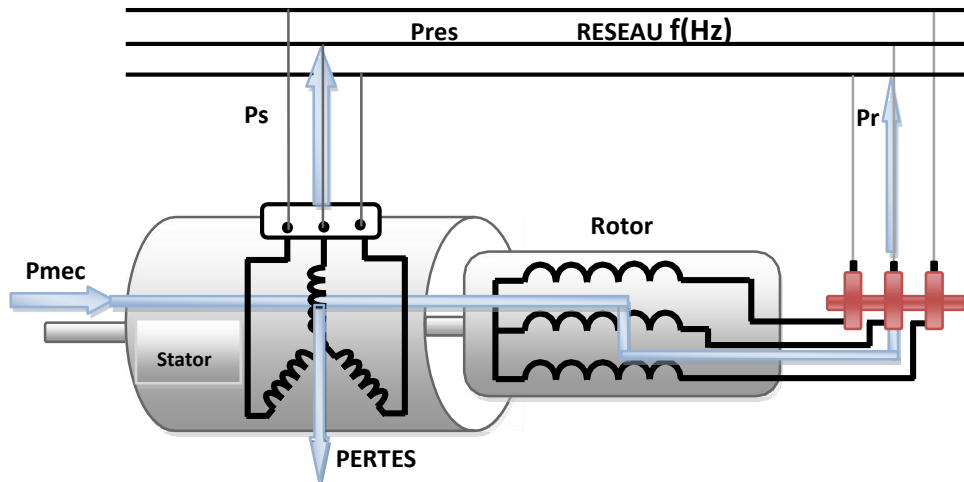


Figure 1.9 Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone.

On peut résumer ces différents modes dans le tableau suivant :

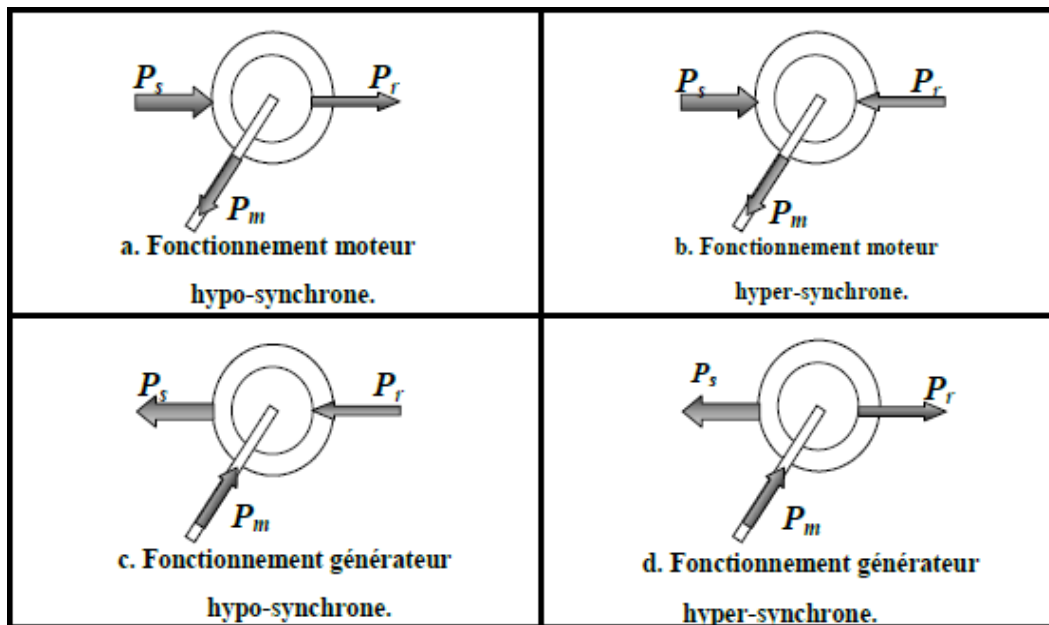


Figure 1.10 Modes de fonctionnement de la MADA.

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

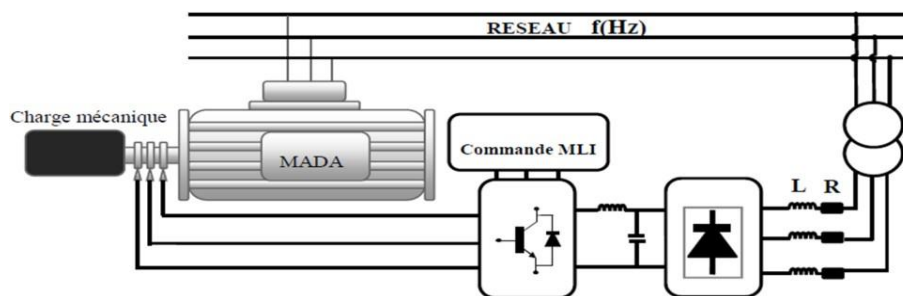
Comme toutes les autres machines électriques à courant alternatif, la MADA peut fonctionner en moteur comme en génératrice. Chaque mode de fonctionnement est caractérisé par une configuration qui répond à un critère choisis. Dans cette partie du chapitre, on va citer les configurations les plus utilisées,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

### 1.6.1 Configuration pour application moteur :

La variation de la vitesse des machines synchrones et asynchrones classiques nécessitent la variation de la fréquence des courants statorique 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 rotorique [6]

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

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



**Figure 1.11.** Schéma de la MADA dont le rotor est alimenté par un onduleur

Ce mode d'alimentation n'est pas adapté au fonctionnement à faibles fréquences rotorique 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 [8].

### 1.6.3 Stator relié au réseau, rotor alimenté par un cycloconvertisseur

Dans cette configuration les enroulements statorique sont connectés à un réseau triphasé fixe tandis que le rotor est relié à un cycloconvertisseur. La figure (I-4) représente un schéma de principe de cette catégorie de MADA [9]

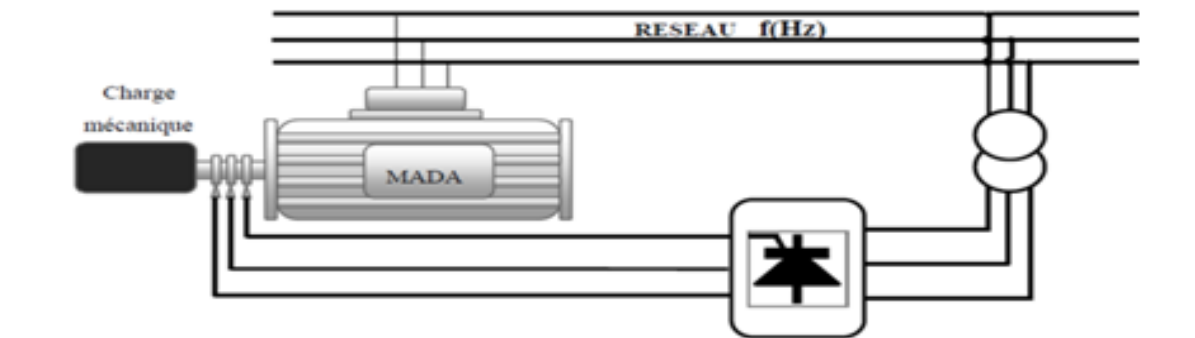


Figure 1.12.Schéma de la MADA dont le rotor alimente par un cycloconvertisseur [3]

### 1.6.4 Stator Alimenté par onduleur, rotor alimenté par un onduleur

Cette configuration consiste en une MADA dont les deux côtés, stator et rotor, sont alimentés par des onduleurs de tension .Elle peut prendre deux formes équivalentes :

Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun, ce dernier est donc une source d'alimentation commune aux deux côtés. [10]

Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs. Dans ce cas, c'est le réseau qui est la source du couplage électrique existant entre les deux côtés [11].

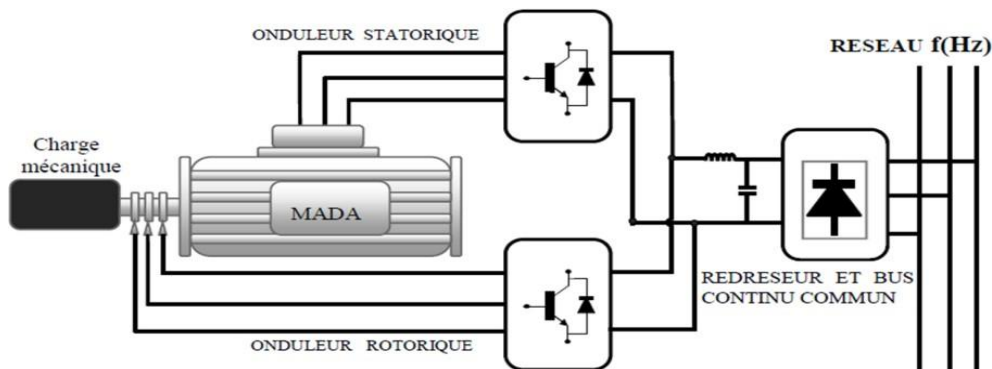


Figure 1-13.Schéma synoptique pour l'alimentation par deux cycloconvertisseur [3]

### 1.6.5 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.

1.6.6 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 [6].

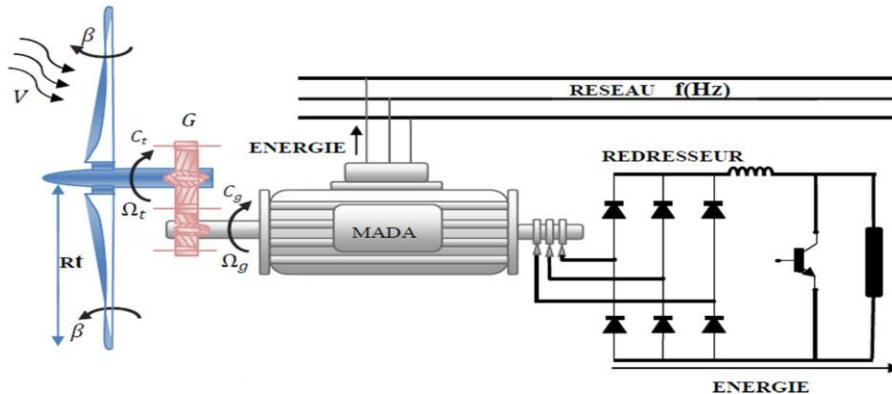


Figure 1.14. MADA à énergie rotorique dissipée

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.

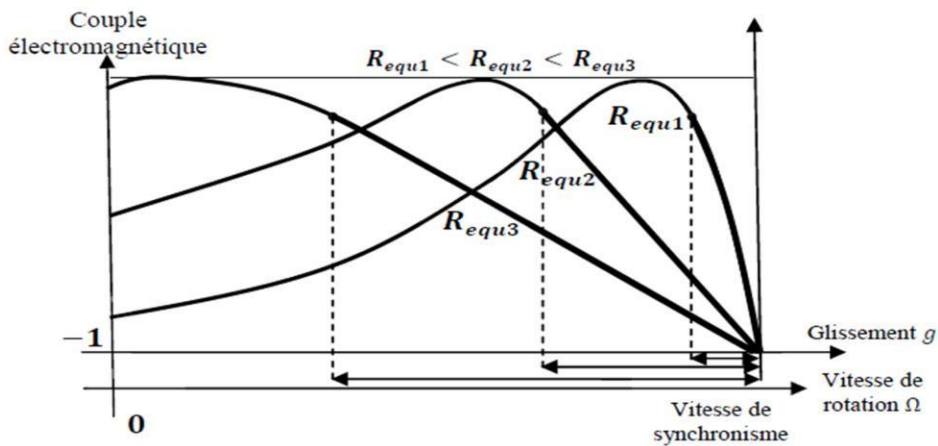


Figure 1-15. Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique

1.6.6.1 Machine asynchrone à double alimentation - structure de Kramer

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau appelé (structure de Kramer figure (1.16)).



L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Comme dans le cas de la machine brushless ce système est avantageux

S'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine [12]

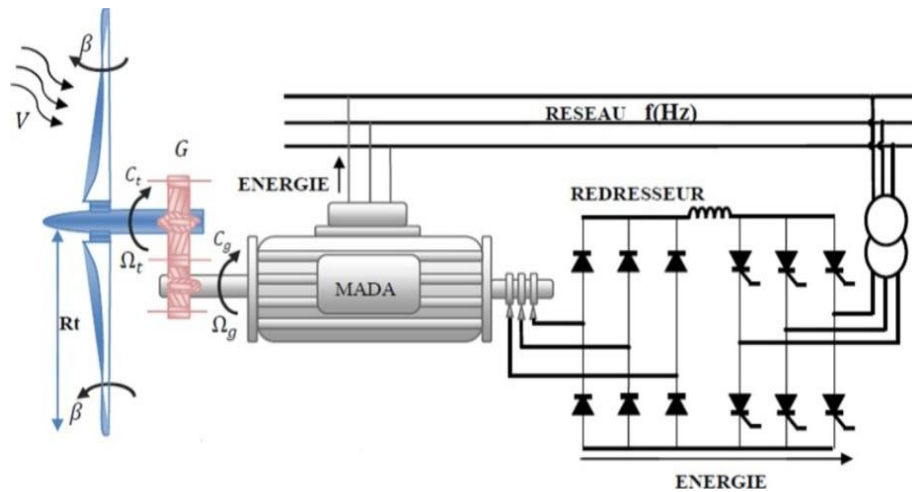


Figure 1.16. MADA, structure Kramer [12]

### 1.6.6.2 Machine asynchrone à double alimentation structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cycloconvertisseur indiqué par la figure (1.17.8) l'ensemble est alors appelé structure de Scherbius (figure 1.17).

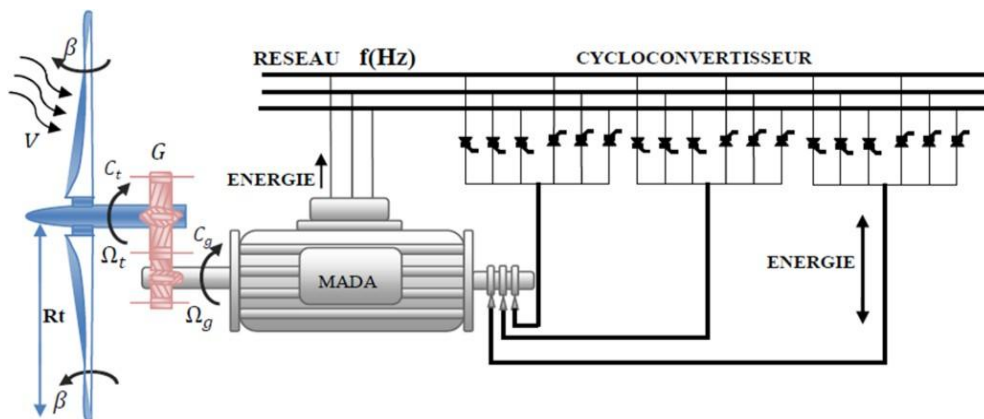


Figure 1-17. structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la figure (1.16) En effet si la variation du glissement doit rester inférieure à 30% pour maintenir l'efficacité du système, cette variation peut être positive ou négative. [13]

**1.6.6.3 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec convertisseur MLI :**

Cette configuration a les mêmes caractéristiques que la structure de Scherbius avec cycloconvertisseur. Toutefois les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO [18]. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées)

La structure du dispositif et la philosophie de fonctionnement sont semblables à celle de la MADA de type "brushless" . Toutefois, malgré la présence de contacts glissants qui doivent être entretenus et remplacés périodiquement, la conception de cette machine est plus conventionnelle et plus simple que la machine brushless (un seul bobinage au stator, un autre au rotor). Plusieurs études récentes , confirmées par des réalisations industrielles, montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien à vitesse variable. La bi-directionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau (figure 1.18)

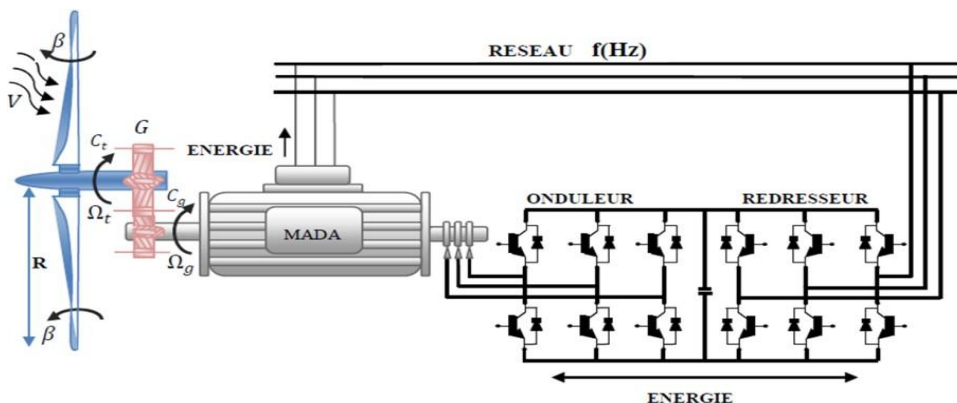


Figure 1.18. Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI [19]

## 1.7 Avantages et inconvénients de la MADA

Les principaux avantages et inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation lors l'utilisation dans les différents domaines des vitesses variables :

### 1.7.1 Avantages de la MADA

Parmi ses nombreux avantages, on peut citer :

- dimensionnés pour la puissance nominale, les pertes dans les interrupteurs à semi-conducteurs sont faibles dans ce cas, le rendement du système de conversion est ainsi amélioré ;
- En fonctionnement générateur, 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 présent la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones et asynchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée
- La possibilité de fonctionner à couple constant au delà de la vitesse nominale
- La MADA se comporte comme une machine synchrone et l'on peut pratiquer des rapports de démagnétisation très importants (de l'ordre de 1 à 6) .
- 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 [14] .

### 1.7.2 Inconvénients de la MADA :

- Malgré les avantages, la MADA présente des inconvénients liés essentiellement au système bagues-balais comme :
- Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente grâce à la présence du système bagues-balais ;

- Le surcoût engendré par la maintenance due à l'emploi d'un multiplicateur de vitesse et du système bagues-balais de la MADA, comparativement aux autres machines telles que: la machine synchrone à aimants permanents et la machine à réluctance variable ;
- L'aspect multi-convertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs (redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) et par conséquent le prix. Pourtant certaines études prétendent le cont.

## 1.8 Domaines d'application de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation peut être utilisée dans plusieurs applications industrielles telles que:

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines.
- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime.
- Les applications de levage, ascenseurs, monte-charge, etc. sont visées. [15]

## 1.9 Défaillances dans les machines asynchrones :

On désigne par défaillance dans les machines électriques tout incident donnant lieu comportement anormal de la machine et qui peut à court ou long terme provoquer son endommagement. Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques...etc.[16]

### 1.9.1 Les causes des défauts :

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

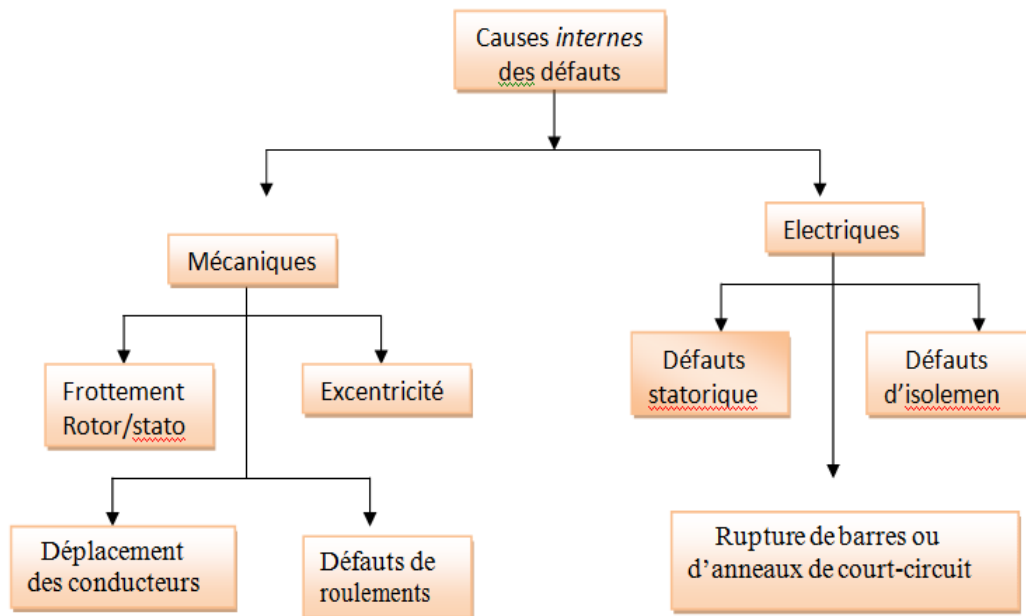
**a. Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts** : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations...etc.

**b. Les amplificateurs de défauts** : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement...etc.

c. **Les vices de fabrication et les erreurs humaines** : défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine...etc. [17]

**1.9.2 Classification des défauts :**

Il existe deux types de défauts principaux : *internes* et *externes*. Les causes de ces défauts sont brièvement et respectivement décrites dans les organigrammes des figures (1.21) et (1.22). Nous pouvons ainsi remarquer que les défauts internes de la machine sont causés par les constituants de la machine (circuits magnétiques rotorique et statorique, bobinages statorique , entrefer mécanique...) alors que les défauts externes sont provoqués soit par les tensions d'alimentation et la charge mécanique [18]



**Figure 1.21.** Causes internes de défauts de la machine asynchrone

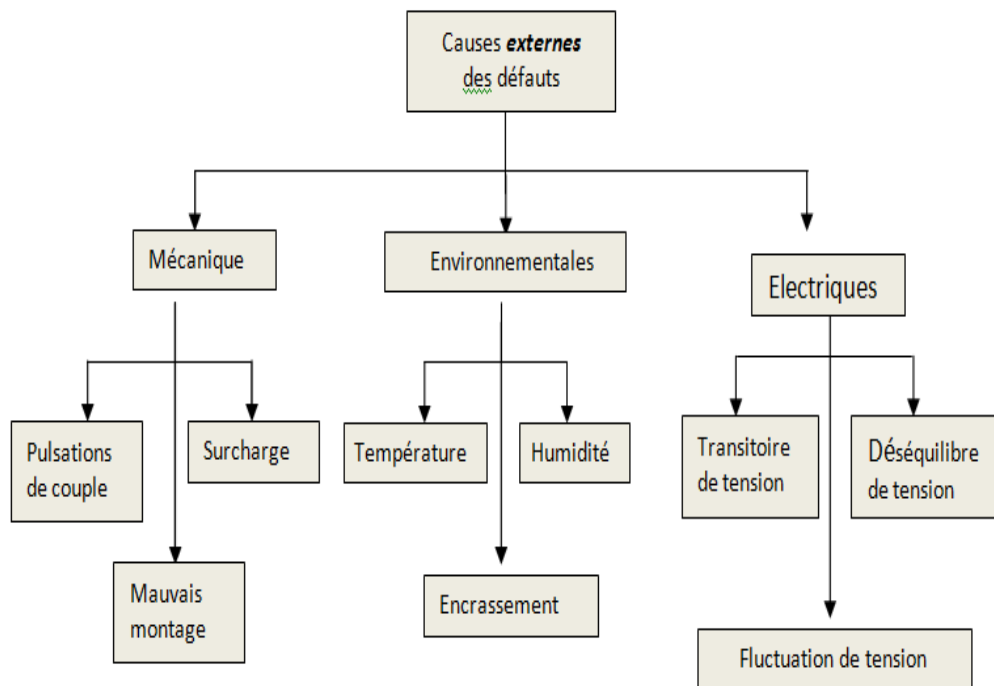


Figure 1.22. Causes externes de défauts de la machine asynchrone

## 1.10. 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.

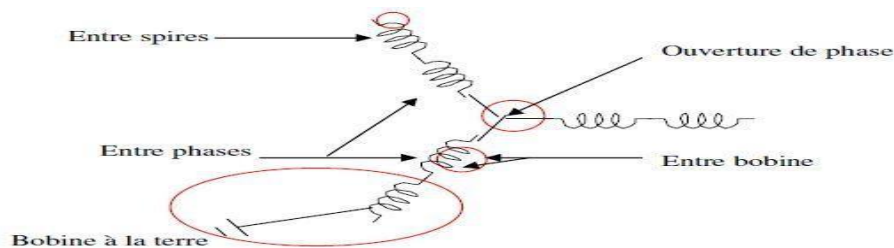
On distingue deux types de défauts dans la machine asynchrone :

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

### 1.10.1. 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 statorique 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 1.23).



**Figure 1.23.**représentation des différents défauts statorique 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.

### 1.10.2. Défauts affectant le rotor :

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

#### 1.10.2.1.Rotor à cage d'écureuil :

Les défauts affectant ce type peuvent être :

#### 1.10.2.2. 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 [19].

### **1.10.3. 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.

### **1.10.4. 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 1.24) :

#### **1.10.4.1. 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.

#### **1.10.4.2. 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 [20].



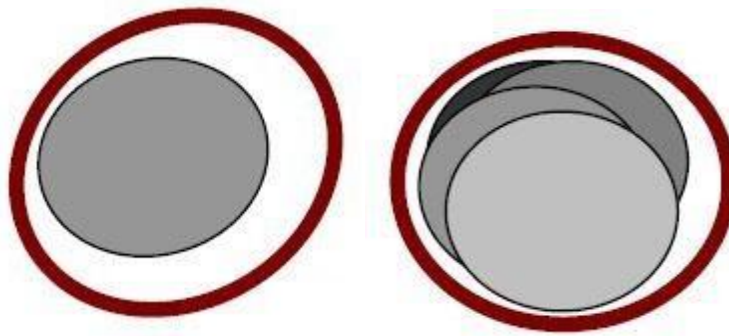


Figure 1.24. Représentation de l'excentricité statique et dynamique

## 1.11. Rotor bobiné :

### 1.11.1. 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 [21].

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 statorique talque 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.

### 1.11.2. Défaut de contact balai – bague :

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

## 1.12 Méthodes de diagnostic utilisées pour détecter les défauts de la machine :

### 1.12.1 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).

### 1.12.1.1 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 [22], [23], 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.  $(\theta, t) = Bs^2(\theta, t)2\mu_0$

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

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 coût des capteurs de variation qui est relativement élevé, ainsi que les difficultés rencontrées dans la connexion de ce capteur (problème d'accessibilité) représentent les limites et les inconvénients de cette méthode.

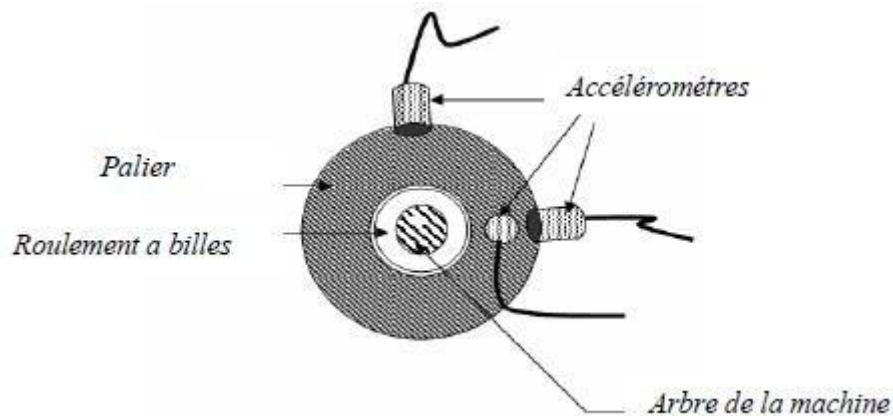


Figure 1.25. Mesures vibratoires sur la machine asynchrone

#### 1.12.1.2 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 [24].

L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé de la machine [25].

#### 1.12.1.3 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 (Motor Current 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)

#### 1.12.1.4 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:  $is\beta = (is\alpha)$ . Le changement de l'épaisseur et de la forme de cette courbe donne une information sur le défaut [26]. La deuxième est appelée

Vecteur de Park Étendu, qui est basée sur l'analyse spectrale du module du vecteur de Park  $V_{\alpha 2 + i\beta 2}$ . Elle présente beaucoup d'avantages quant à la détection des défauts statorique ou rotorique et même les défauts de roulement [26].

### 1.12.1.5 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 :

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

## 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 cepstre 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 :**

Dans ce chapitre nous avons établis une description de la machine asynchrone et son principe de fonctionnement (les différents types de moteur a cage, rotor bobinée et même double alimentation)

Ensuite nous sommes intéressés par la constitution de la machine asynchrone à double alimentation, son principe de fonctionnement, classification, comparaisant entre la différente variante, régime de fonctionnement et transfert de puissance ...

On a également fait mention une étude statique qui présente les défauts pouvant se produire sur la MAS, avec l'élaboration des différentes diagnostiques de la machine (traitement de signaux, détection de fréquence connue...).

# **Chapitre 02**

## **Modélisation de la MADA par la méthode des éléments finis**

### 2.1 Introduction :

La modélisation et la simulation des machines constituent une étape primordiale en matière de diagnostic. Elles permettent la compréhension du fonctionnement défectueux, la vérification sur le prototype virtuel de l'efficacité des algorithmes de détection de défauts et elles apportent également la possibilité de construire des bases des données sur les manifestations électriques et magnétiques de ces défauts. Parmi les approches de modélisations existantes, nous allons baser sur la méthode des éléments finis [29,28]

La modélisation par éléments finis (FEM), utilisée parmi toutes les méthodes de modélisation utilisées pour détecter diverses erreurs dans une machine asynchrone, fournit un espace cohérent plus proche de celui d'une machine réelle. Cela permet une application fiable des différentes technologies d'analyse de signal de l'appareil. Une grande partie de ce chapitre sera consacrée à cette modélisation avec une description détaillée des étapes nécessaires à la construction d'un prototype de duplexeur asynchrone.

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

Nous exposons les principales méthodes de modélisation fine de la machine asynchrone à double alimentation, nous pouvons énoncer les plus populaires dont ceux basés sur :

- la méthode des réseaux de perméance.
- la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC).
- la Modélisation analytique par CEMC (CEMC-A).
- le Modèle à circuits internes équivalents (CIE).
- la méthode des éléments finis.



### 2.2.1 la 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 perméance ne peut se faire qu'en fixant une valeur précise pour la perméabilité relative du fer  $\mu$ . Le mouvement de rotation de la machine est pris en compte par l'intermédiaire de perméance d'entrefer variables selon la position du rotor de la machine. [3]

### 2. 2.2 Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés :

L'approche de modélisation par circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC) repose sur une modélisation semi-analytique de la machine synchrone à aimants permanents. Cette méthode de modélisation est assez générique au sens où elle s'appuie sur une description des couplages électromagnétiques au sein de la machine en se basant sur la topologie géométrique et constitutive de la machine [30]. Cette méthode est basée sur la représentation des bobinages de la machine par des circuits électriques distribués sans utiliser aucune transformation. Ce type d'approche offre un modèle de machine flexible, un temps de calcul raisonnable et ne nécessite aucun recours au calcul de champs [31]

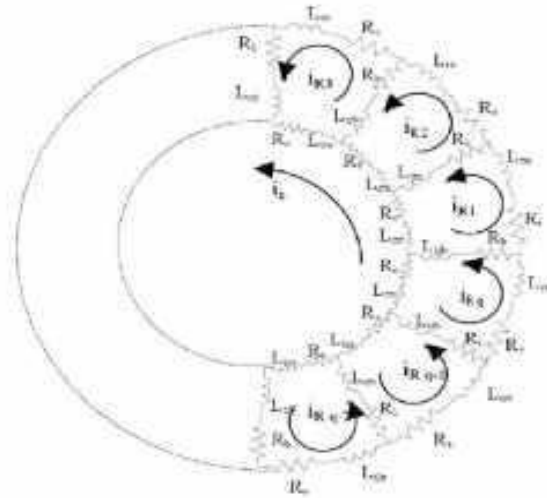


Figure 2.1. Schéma électrique équivalente de la cage rotorique.[43]

### 2.2.3 Modélisation analytique par CEMC (CEMC-A) :

Dans cette méthode, les inductances sont calculées analytiquement, Cette approche permet de prendre en compte les harmoniques d'espace les plus importants tout en réduisant le temps de calcul, les inductances n'étant plus calculées par intégration numérique. La prise en compte de ces harmoniques d'espace est effectuée grâce à un développement en série de Fourier de l'induction dans l'entrefer de la machine. Il en résulte une écriture en série de Fourier des expressions des inductances propres et mutuelles. Ces quelques harmoniques

D'espace prise en compte dans l'expression des inductances induisent des harmoniques d'espace équivalents dans les courants de phases et dont l'analyse apporte une information pertinente pour le diagnostic des barres cassées au rotor de la machine asynchrone, [32]

Nous intéressons, alors, à l'élaboration d'un modèle qui tient compte de la topologie, des dimensions ainsi que de la composition de la machine asynchrone, basée sur la méthode des éléments finis. Sous logiciel Flux 2D® de la machine asynchrone.

### 2.2.4 la méthode des éléments finis :

#### 2.2.4.1 le principe :

La méthode des éléments finis est basée sur la résolution numérique des équations de Maxwell. Les informations fournies par ce type de simulation sont d'une grande précision et elles nous apportent la prise en compte de la géométrie de la machine, la saturation des matériaux magnétiques, ainsi que l'effet de peau dans les barres rotorique, 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 la machine (fréquence et flux magnétisant), en modifiant, directement, les paramètres dans le programme du calcul (Logiciel) d'où une grande souplesse d'utilisation [33]. Toutefois, cette méthode peut être gourmande en temps de calculs, surtout si l'on souhaite augmenter la précision des résultats et optimiser la machine. Ils sont donc davantage destinés aux étapes fines du dimensionnement qui correspondent aussi aux phases finales du design [34].

Il existe des nombreux logiciels comme : Maxwell2D/3D, COMSOL, Opéra, Flux 2D/3D qui permettent d'aborder cette approche difficile. Le but principal de ces logiciels est de déterminer la cartographie du champ magnétique présent dans les machines électriques dans l'objectif d'optimiser le dimensionnement de ces dernières [35]. Pour cette étude, on utilise le logiciel Flux2D/3D.

Le principe fondamental de la méthode des éléments finis réside dans le découpage du domaine d'étude en domaines élémentaires de dimension finie , un élément de découpage peut être approché par des fonctions d'approximations (dites fonctions de formes), . La majorité des formes d'approximations du potentiel dans un élément sont des approximations polynomiales.

Pour élément triangulaire on a :

$$Ae(x, y) = a + bx + cy \quad (2.1)$$

Pour les éléments quadrilatéraux on a:

$$Ae(x, y) = a + bx + cy + dxy \quad (2.2)$$

## Chapitre 02 Modélisation de la MADA par la méthode d'élément finis

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 :

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

**e** : Nombre d'élément et **ne** : 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. 2.2)

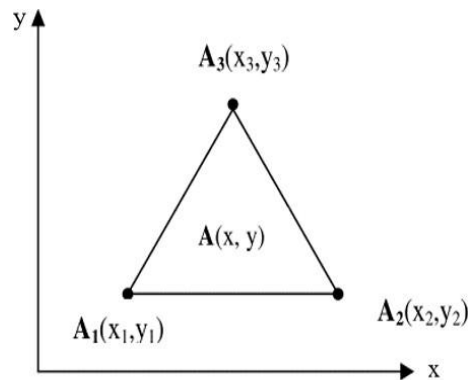


Figure 2.2 .Fonction d'interpolation d'un élément

### 2.3 Les avantages et les inconvénients de la méthode éléments finis :

#### 2.3.1 Avantages de la méthode des éléments finis

Saturation locale et avec détails de la Géométrie

Adaptation aux géométries complexes.

Temps de calcul relativement avantageux.

Prise en compte des non linéarités.

#### 2.3.2 Inconvénients de la méthode des éléments finis

Inapplicable sur les domaines infinis.

Mise en œuvre relativement difficile.

Présence des singularités dans le domaine d'étude.

### 2.4 Les équations de Maxwell :

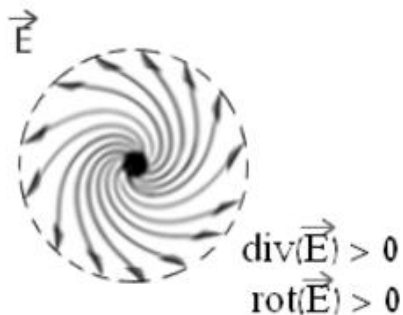
Dans les machines électriques les équations qui régissent le champ électromagnétique sont les équations de Maxwell associées aux relations constitutives du milieu considéré. On les définit comme suit :

- **Equation de Maxwell-Faraday :** (phénomène d'induction)

Le champ électrique induit est utilisé dans de nombreux générateurs électriques. Un aimant permanent en rotation qui crée un champ magnétique en mouvement, génère un champ électrique dans un fil à proximité [36]

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\text{div}(\vec{E}) > 0 \quad (2.4)$$



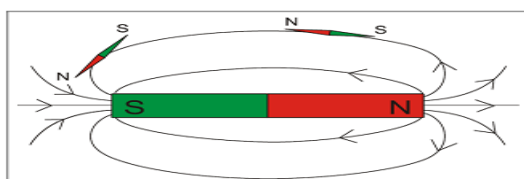
- **Equation de Maxwell-Ampère :**

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.5)$$

- **Equation de conservation de flux magnétique :**

La formule de Maxwell-Flux (aussi connue sous le nom de Maxwell-Thomson ou Maxwell-Kelvin ; Thomson et Kelvin étant une et même personne) stipule que la divergence du champ magnétique est nulle.

$$\overrightarrow{\text{div}} \vec{B} = 0 \quad (2.6)$$



- **Equation de Maxwell-Gauss :**

Un champ électrique est généré par des charges électriques. Le champ électrique est orienté à partir des charges positives vers les charges négatives. Plus précisément, cette loi relie le flux électrique à travers n'importe quelle surface de Gauss fermée [37]

$$\overrightarrow{\text{div}} \vec{D} = \rho \quad (2.7)$$

Ces relations suivantes doivent être liées au reste des équations précédentes pour résoudre les problèmes électromagnétiques en fonction de l'environnement à étudier :

Donc :

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (2.8)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (2.9)$$

### 2.4.5 La relation de la loi d'Ohm :

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (2.10)$$

Tels que :

$\vec{E}(V \cdot m^{-1})$	Champ électrique
$\vec{B}(T)$	Induction magnétique
$\vec{H}(A \cdot m^{-1})$	Champ magnétique
$\vec{J}(A \cdot m^{-2})$	Densité de courant de conduction
$\vec{D}(C \cdot m^{-2})$	Induction électrique
$\rho(C \cdot m^{-3})$	Densité de charge volumique
$\frac{\partial \vec{D}}{\partial T}(A \cdot m^{-2})$	Densité de courant de déplacement
$\mu_0 :$	Perméabilité magnétique de vide ( $H \cdot m^{-1}$ )
$\mu$	Perméabilité magnétique ( $H \cdot m^{-1}$ )

$\sigma$  Conductibilité électrique ( $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ )

### 2.5 Le modèle employé :

d'après les résultats de simulation effectués dans un laps de temps donné, on peut utiliser trois types de méthodes : [38]

#### 2.5.1 Mode magnétostatique :

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

$$\frac{d\vec{B}}{dt} = \mathbf{0} \quad (2.11)$$

Par conséquent, les équations du modèle deviennent :

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

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

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

La condition (2.8) permet de définir une fonction en vecteur potentiel  $\mathbf{A}$  telle que :

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

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

Par la substitution de (2.10) et (2.9) dans (2.7) nous obtenons l'équation électromagnétique en magnétostatique, exprimée par le système d'équations suivant :

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

Où

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

### 2.5.2 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 simuler 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 :

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

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

$j$  : unité imaginaire ( $i^2 = -1$ )

### 2.5.3 Le mode magnétique transitoire

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

Donc le système à résoudre est le suivant :

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

## 2.6 Logiciel de résolution :

Les logiciels à éléments finis modernes sont souvent à structure modulaire où les différentes étapes de résolution : introduction des données géométriques et des propriétés physiques ; maillage ; résolution ; exploitation des résultats ; sont séquentiellement exécutées



Toutefois, en utilisant une méthode des éléments 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 que nous allons présenter dans ce qui va suivre. [39]

### 2.6.1. Structure du FLUX 2D :

- **Introduction**

Ce logiciel a été conçu et réalisé en 1981 par le laboratoire d'électrotechnique de Grenoble. Il est depuis cette date commercialisé par la société CEDRAT et est aujourd'hui utilisé par les principaux constructeurs de matériel électrique. Développé au départ pour les applications électrostatiques et magnétostatiques, il comprend aujourd'hui 20 modules qui permettent d'aborder l'ensemble des problèmes qui se posent lors de la conception d'un appareil électromagnétique.

- **Définition :**

Flux2d 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. Nous ne détaillerons pas son fonctionnement car des tutoriaux sont très bien conçus et ce n'est pas le propos [40]

il permet aussi 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.



Figure2.3. Figure de logiciel flux2D

- **Construction Module pré-processeur :**

Permet, à travers plusieurs modules, de définir la géométrie et le maillage du dispositif à étudier (géométrie & physis), de choisir et de construire une banque de matériaux (Materials database) et de définir le schéma et les données du circuit électrique (Circuit).

- **(Module Solving Process )Module processeur**

Constitué principalement d'un module de résolution 2D (SOLVER\_2D) des différents modèles usuels de l'électromagnétisme et des problèmes thermiques. :[3]

- **Module Analysis (post-processeur de Flux-2D)**

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.

Pour analyser des dispositifs électriques, magnétiques et thermiques par la méthode des éléments finis dans le logiciel Flux (2D/3D), Cinq étapes essentielles pour la création et l'analyse des résultats du projet :

- Construction géométrique
- Génération du maillage
- Propriétés physique
- Résolution
- Exploitation des résultats

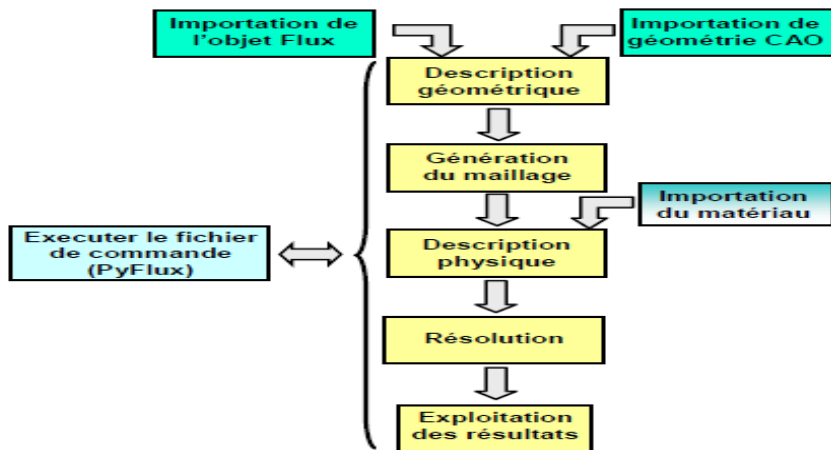
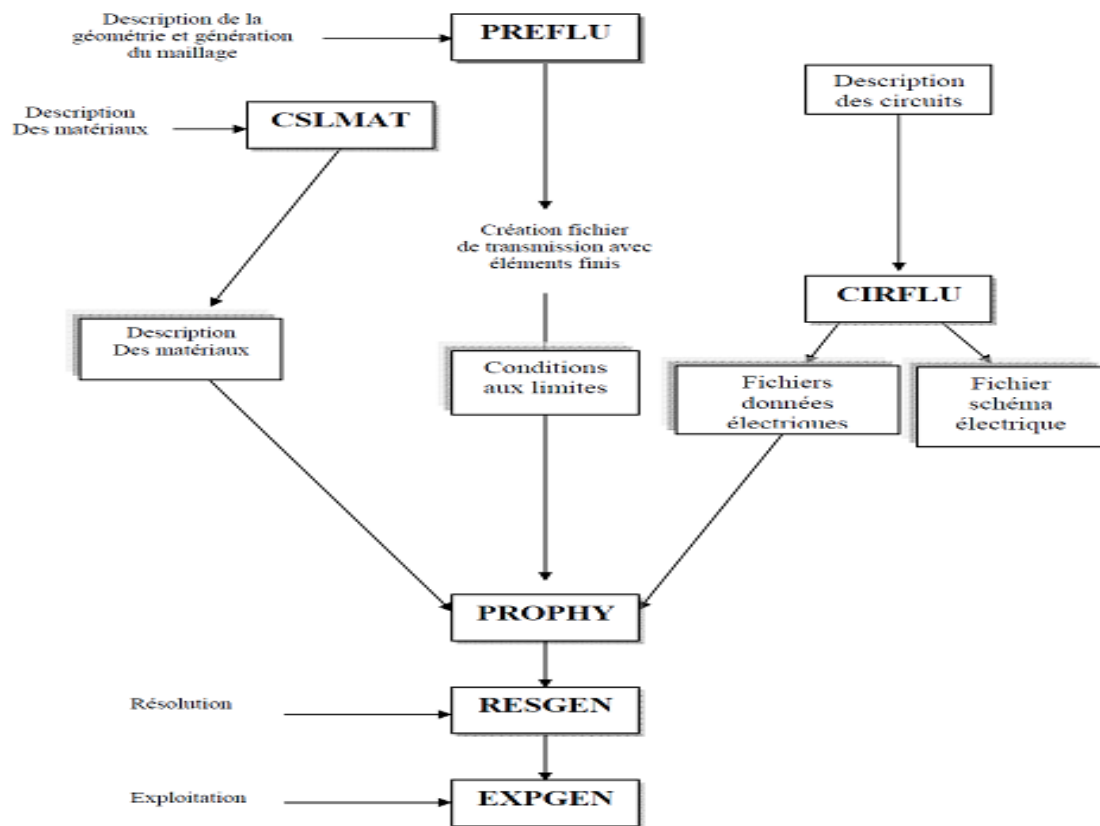


Figure 2.4. Figure de Construction d'un projet Flux (2D/3D)

- **Enchaînement de base dans FLUX2D :**

De façon générale, l'enchaînement des programmes de Flux 2D, doté d'une interface schématisée par la figure (II.2). [3]



**Figure 2.5.** Schéma des différents modules du logiciel Flux-2

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. Cette méthode semble relativement précise si l'on la compare à des simulations sous Flux3D

### 2.6.2 .Procédure de construction du modèle par FLUX2D :

Il existe une différence dans le comportement d'une machine saine et autre avec défauts, remarquée par la considération de la machine saine un seul pôle grâce à sa symétrie électrique et magnétique par rapport à son axe de rotation. Contrairement à la machine avec défaut qui perd sa

## Chapitre 02 Modélisation de la MADA par la méthode d'élément finis

---

symétrie. Ce qu'il nécessite la création d'une géométrie complète pour étudier son comportement avec défauts.

Pour assurer la simplicité de la méthode de construction, on commence par la size des paramètres géométriques et des systèmes coordonnés pour modéliser le schéma d'un  $\frac{1}{2}$  slot (stator/rotor). Pour compléter la moitié reste de slot il suffit juste d'ajouter une transformation en citant l'angle de rotation ; ce qui servir à désigner la moitié de cercle extérieure avec un arc définie par rayon (sod/2). Le même travail est appliqué pour construire aussi la première barre rotorique, le reste de géométrie et de maillage est réalisée 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.

2.7 Structure du circuit magnétique de la machine :

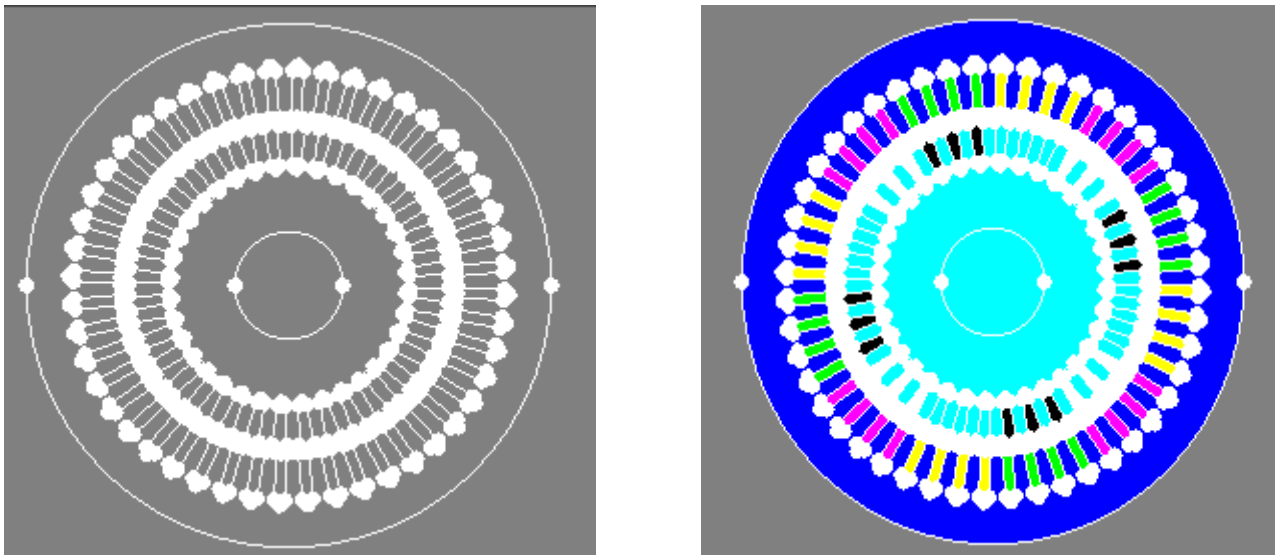


Figure 2.6. Structure de la géométrie de la MADA.

- **Stator** contient une culasse qui est définie par un matériau magnétique caractérisé par une courbe d'aimantation  $B(H)$ , avec la Diamètre extérieur 180mm et Diamètre intérieur 121mm et 48 encoches statorique qui sont définies par un matériau non magnétique.

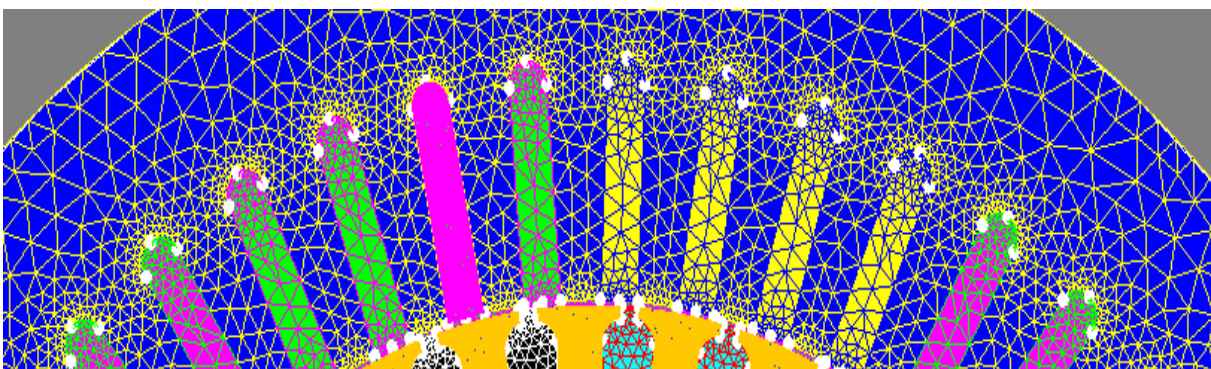


Figure 2.7. Structure de les slote statorique

- **Rotor** contient les bobines court-circuit avec la Diamètre extérieur 120mm et Diamètre intérieur 50 mm 36 encoches rotorique qui sont définies par un matériau non magnétique.

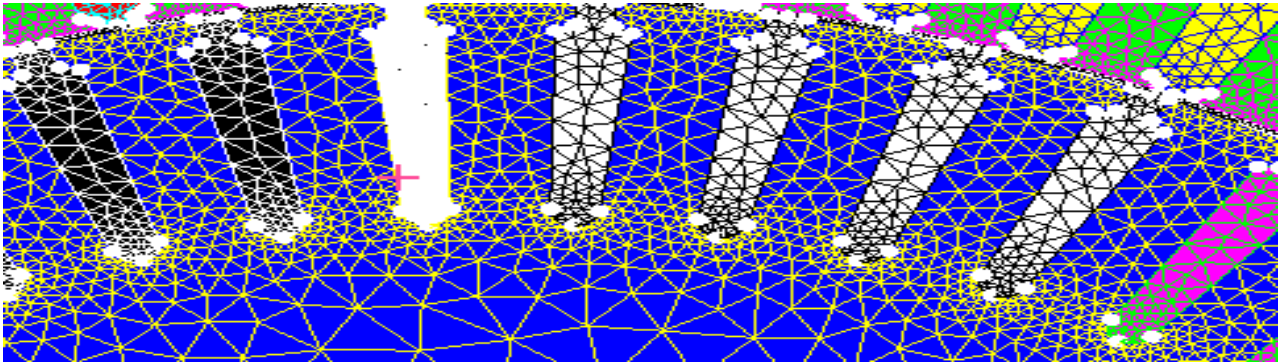


Figure 2.8. Structure de les slote rotorique.

- **Entrefer** d'épaisseur égale à 0.44 mm



Figure2.9. l'entrefer

### 2.8 Génération de maillage :

Un maillage est une structure de données géométrique composée de sommets de l'espace, reliés entre eux par des arêtes et plus généralement, par des éléments. Ces 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  $360/36$ . Pour le stator on définit une transformation du même type avec un angle égale à  $360/48$ . On applique la première à la surface qui représente la surface de l'encoche rotorique 36 fois et la deuxième à la surface de l'encoche statorique 48 fois en choisissant la commande Add Faces and associated Linked Mesh

## Chapitre 02 Modélisation de la MADA par la méthode d'élément finis

---

Générateur 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 48 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.

Donc L'exploitation principale du modèle éléments finis a pour objectif de dresser un diagnostic, ce qui exige un maillage du domaine de calcul assez fin dans l'entrefer, dans les régions de type conducteur massif et au niveau des régions des encoches statorique. Ces paramètres sont nécessaires pour assurer un compromis raisonnable entre la précision et la rapidité de calcul numérique. Le maillage du circuit magnétique, est présenté dans la figure (2.10) Le maillage comporte 79618 éléments surfaciques et 163171 nœuds et 16584 éléments linéiques.

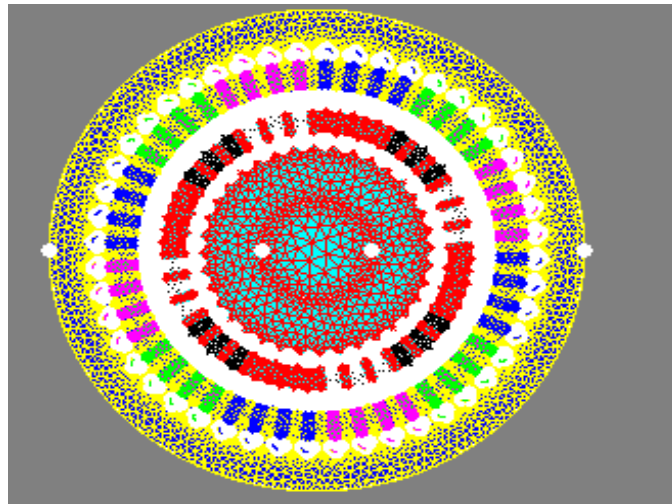


Figure 2.10. Répartition du maillage triangulaire dans la géométrie

### 2.9 Création des matériaux

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



Valeur de champe (A.M- 1)	Valeur de l'induction	Valeur de champe (A.M-1)	Valeur de l'induction	Valeur de champe (A.M-1)	Valeur de l'induction
0.0	0.0	1252.247	1.538588	9005.836	1.866196
53.06401	0.49474237	1550.937	1.57333	10855.24	1.906683
106.128	0.76269641	1909.364	1.60464	13074.53	1.94715
175.5936	0.9717182	2339.477	1.63386	15737.68	1.986467
258.9524	1.1234	2855.613	1.662161	18933.46	2.023382
358.9829	1.237459	3474.976	1.690619	22768.39	2.056555
479.0195	1.325629	4218.211	1.720554	27370.31	2.084597
623.0634	1.395438	5110.093	1.753343	32892.61	2.106104
795.9161	1.451969	6180.353	1.788842	39519.38	2.119661
1003.339	1.498806	7464.663	1.826655	43471.31	2.124628

**TABLEAU DE 2-10 :VALEUR DE CARACTERISTIQUE MATERIAUX MAGNETIQUE**

### 2.10 Circuit électrique :

Pour représenter fidèlement le moteur, il faut tenir compte des effets d'extrémité (inductance, résistance de tête de bobine) :

- les sources de tension d'alimentation :

$$V = 380 * \text{Sqrt}(2) * \text{Sin}(2 * \text{PI} * 50 * \text{TIME})$$

$$V = 380 * \text{Sqrt}(2) * \text{Sin}(2 * \text{PI} * 50 * \text{TIME} - (2 * \text{PI}) / 3)$$

$$V = 380 * \text{Sqrt}(2) * \text{Sin}(2 * \text{PI} * 50 * \text{TIME} + (2 * \text{PI}) / 3)$$

- les Inductances de fuite :

L1, L2, L3.

- résistances des voltmètres pour mesurer les tensions statorique

(R1, R2, R3).

## Chapitre 02 Modélisation de la MADA par la méthode d'élément finis

- **Les bobinages statorique :**
- A (GREEN) ,B(YELLOW),C(MAGENTA)

BA1 →BA4(POSITIF),BA5→BA8(NEGATIF),BA9→BA12(POSITIF) ,BA13→BA16(NEGATIF).

BB1→BB4(POSITIF),BB5→BB8(NEGATIF) ,BB9→BB12(POSITIF),BB13→BB16(NEGATIF).

BC1→BC4(negatif) ;BC5→BC8(positif),BC9→BC12(negatif),BC13→BC16(positif)

- **les Inductances de fuite rotorique :**  
L4, L5, L6.
- **résistances des fuites rotorique :**  
R4, R5, R6.

- **Les bobinages rotorique :**
- A(BLACK),C( WHITE) ,B (TURQUOISE).

BRA1 →BRA3(POSITIF),BRA4→BRA6(NEGATIF),BRA7→BA9(POSITIF) ,BR10→BRA12(NEGATIF)

BRB1 →BRB3(POSITIF),BRB4→BRB6(NEGATIF),BRB7→BRB9(POSITIF) ,BRB10→BRB12(NEGATIF)

BRC1→BC3(negatif) ;BRC4→BRC6(positif),BRC7→BRC9(negatif),BRC10→BRC12(positif)

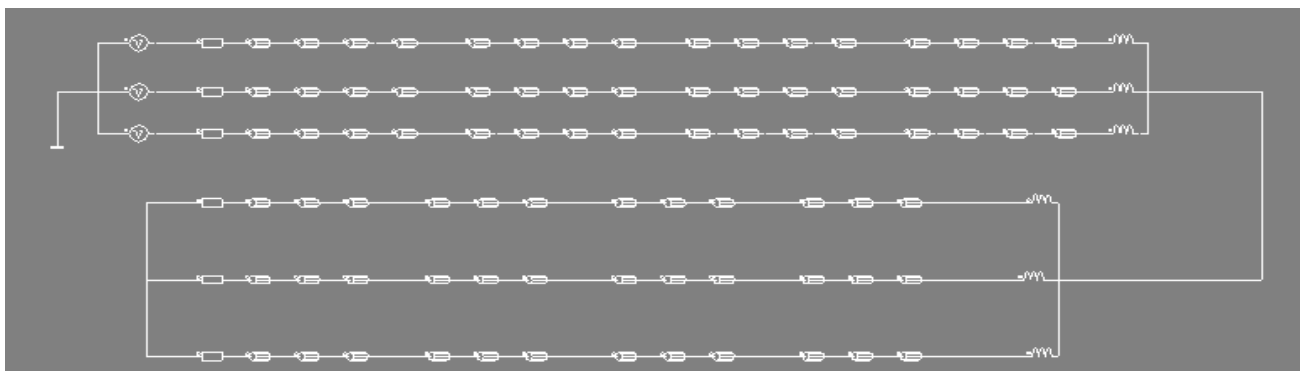


Figure2.11.Circuit couple avec le modèle fer

### 2.11 Structure de bobinage :

Les bobinages répartis dans les encoches d'une MAS sont habituellement de type imbriqué ou ondulé à double couche, avec un nombre entier d'encoches par pôle et par phase.

## Chapitre 02 Modélisation de la MADA par la méthode d'élément finis

La Figure (2.12) représente deux pas polaires uniquement, on y voit aussi la manière dont il est logé dans les encoches. Les bobines de la même phase qui se trouvent côte à côte forment un groupe de bobines qui constitue un pôle magnétique de la phase concernée. Les bobines appartenant à un même groupe sont généralement connectées en série comme dans le cas de la Figure suivante :

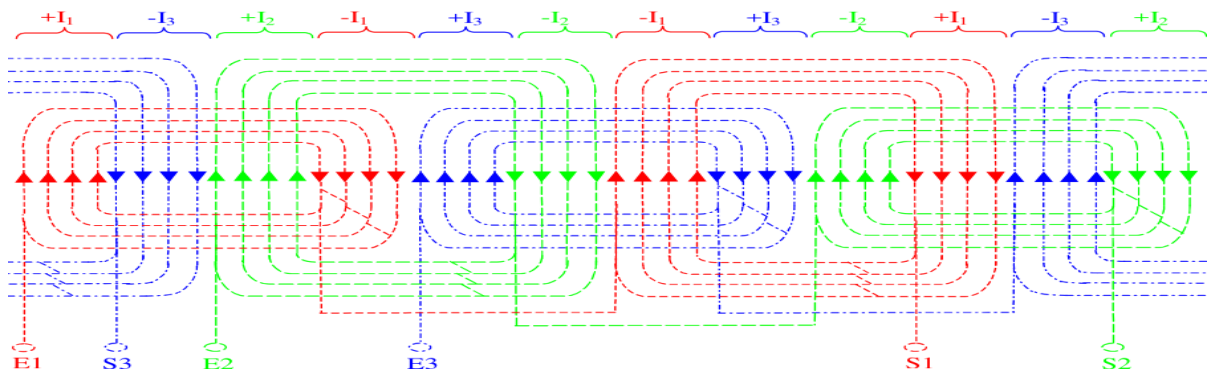


Figure 2.12 Bobinage triphasé représente deux pas polaires lus

### 2.12 Conclusion :

On a vu il existe plusieurs méthodes de modélisation de la machine asynchrone a double alimentation .dans notre travaille on a utilise la méthode des (éléments finis) Nous présentons comment travaille avec logiciel flux2d et on a vu aussi les étapes pour obtenir une moteur asynchrone a double alimentation (géométrie, maillage, marteaux, bobinage, etc....).

**Chapitre 3 :**

**Simulation de la**

**machine asynchrone à**

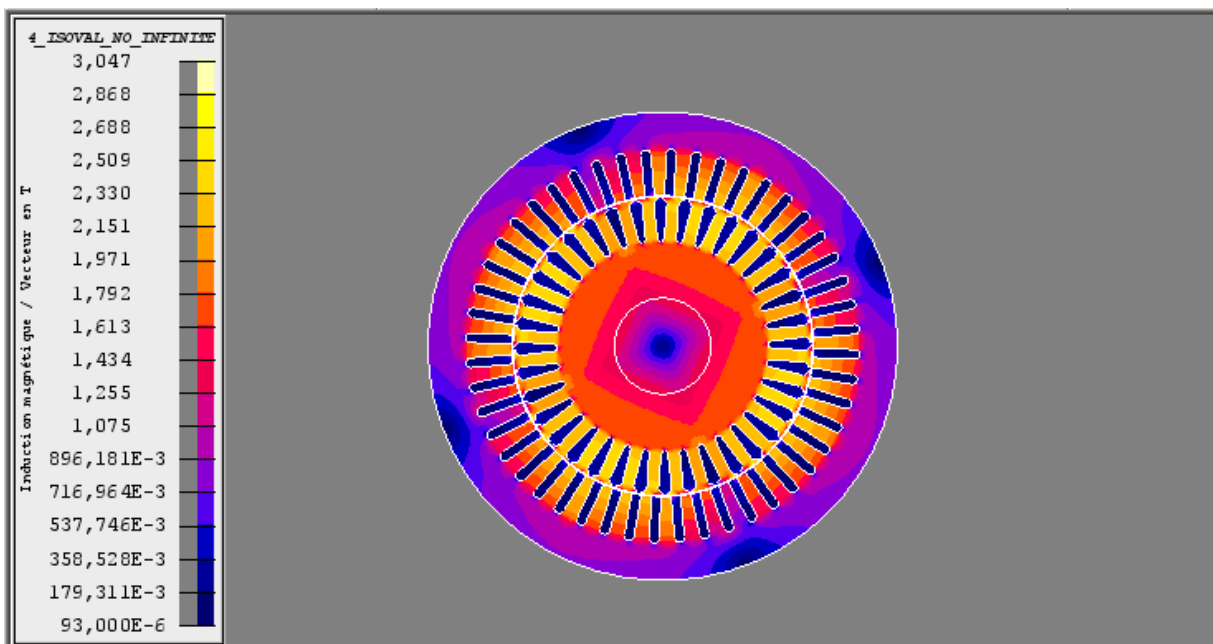
**double alimentation**

### 3.1 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 (3.1) pour un premier essai. Comme deuxième essai, le moteur démarre avec une charge de 10Nm.

### 3.2 Résultats de simulation de la MADA (machine saine) :

Après avoir fait la simulation de la machine en état sans défaut avec un couple résistant nul  $C_r=0$ , nous avons eu les résultats suivants :



**Figure 3.1.** Figure d'induction b vide en régime permanent

La figure 3.1 montre la répartition des lignes équiflux dans le circuit magnétique avec la présence de symétries par rapport aux axes inter polaires. Les lignes de flux entre le stator et le rotor sont légèrement déviées dans le sens de rotation du rotor.

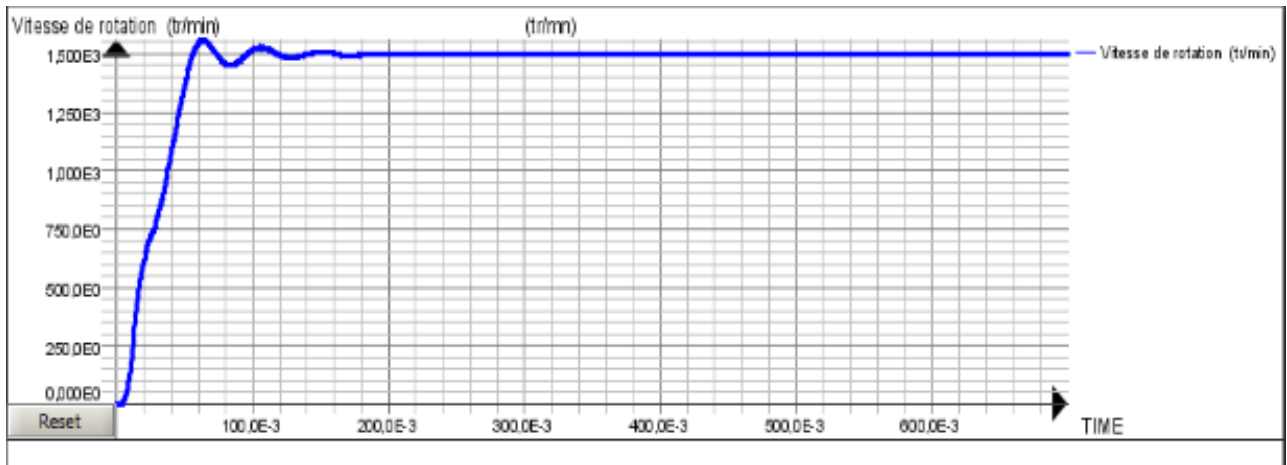


Figure 3.2. Vitesse de rotation de la machine à l'état sain a vide

### Ensemble mécanique / Couple magnétique [ROTOR]

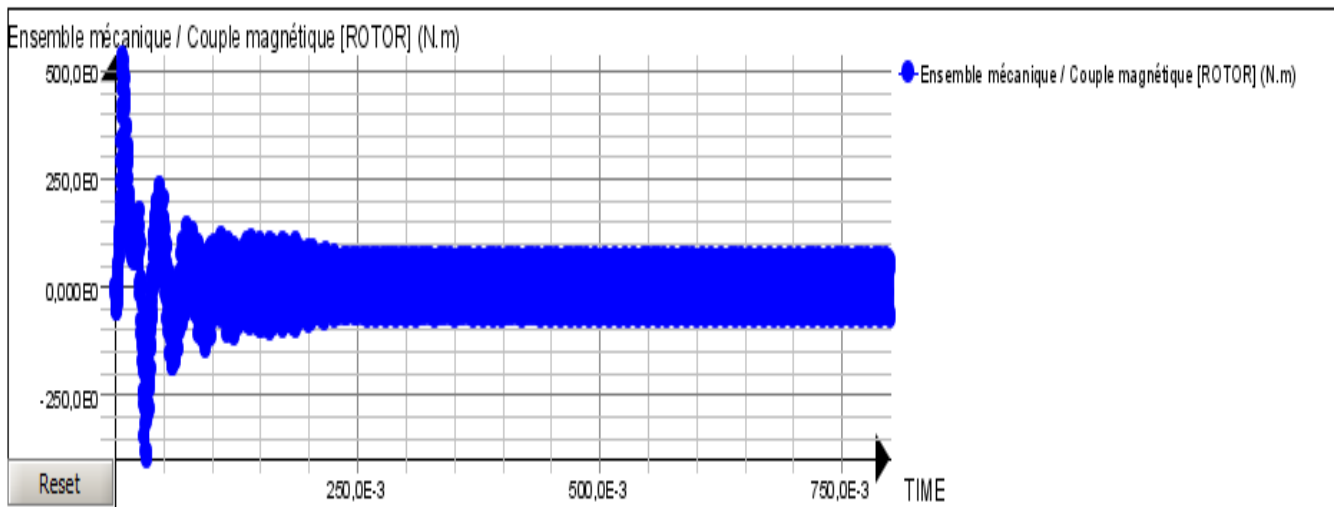


Figure 3.3. Couple électromagnétique de la machine sain a vide

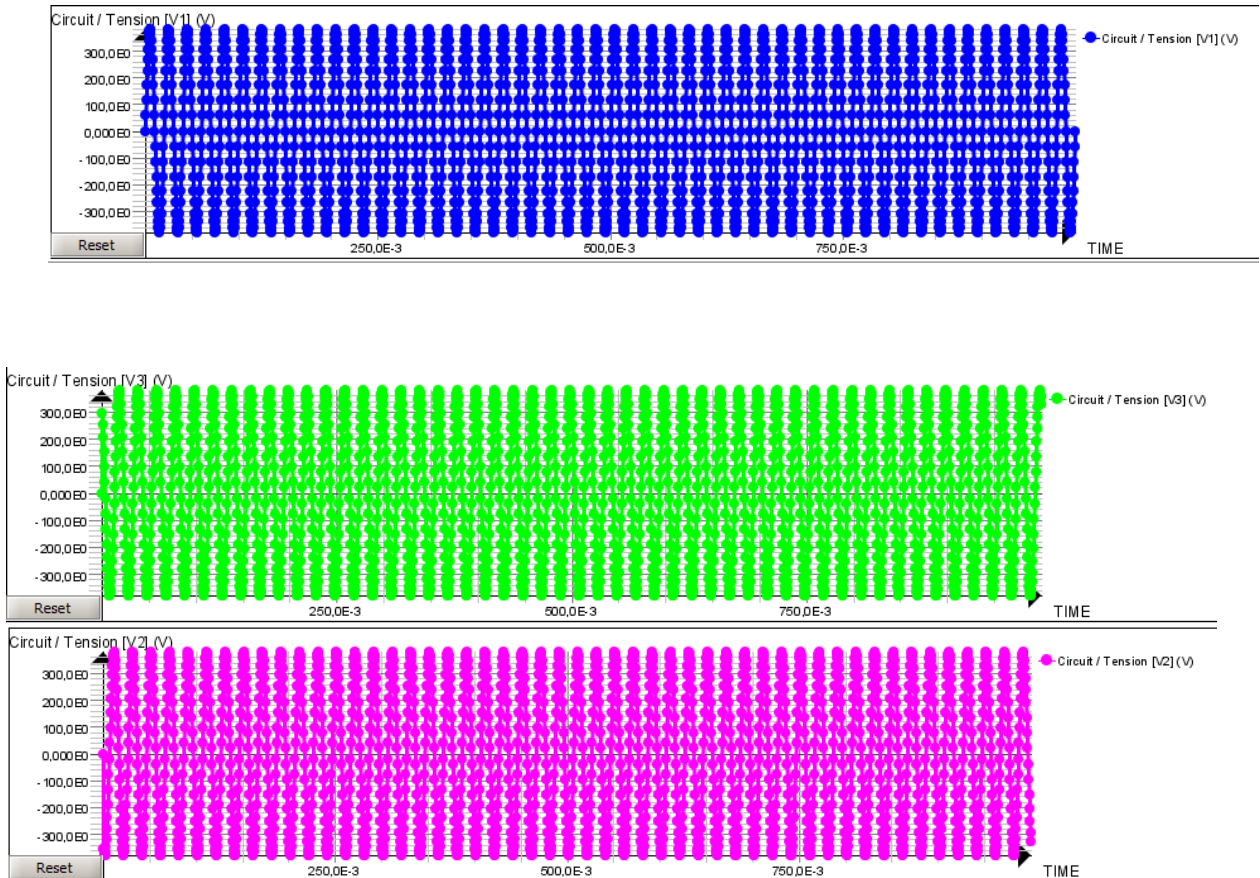
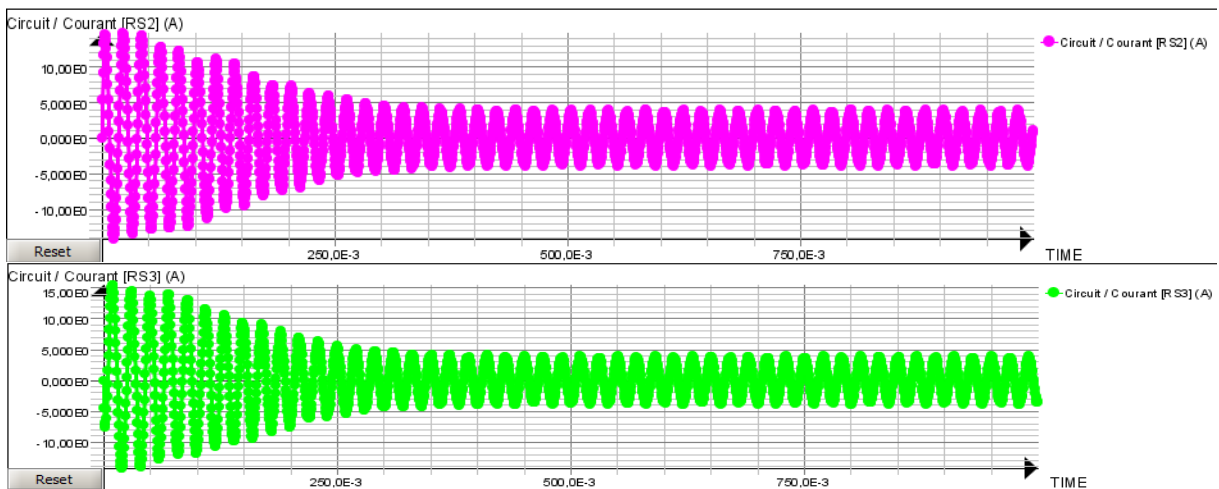


Figure 3.4. Tension d'alimentation équilibré



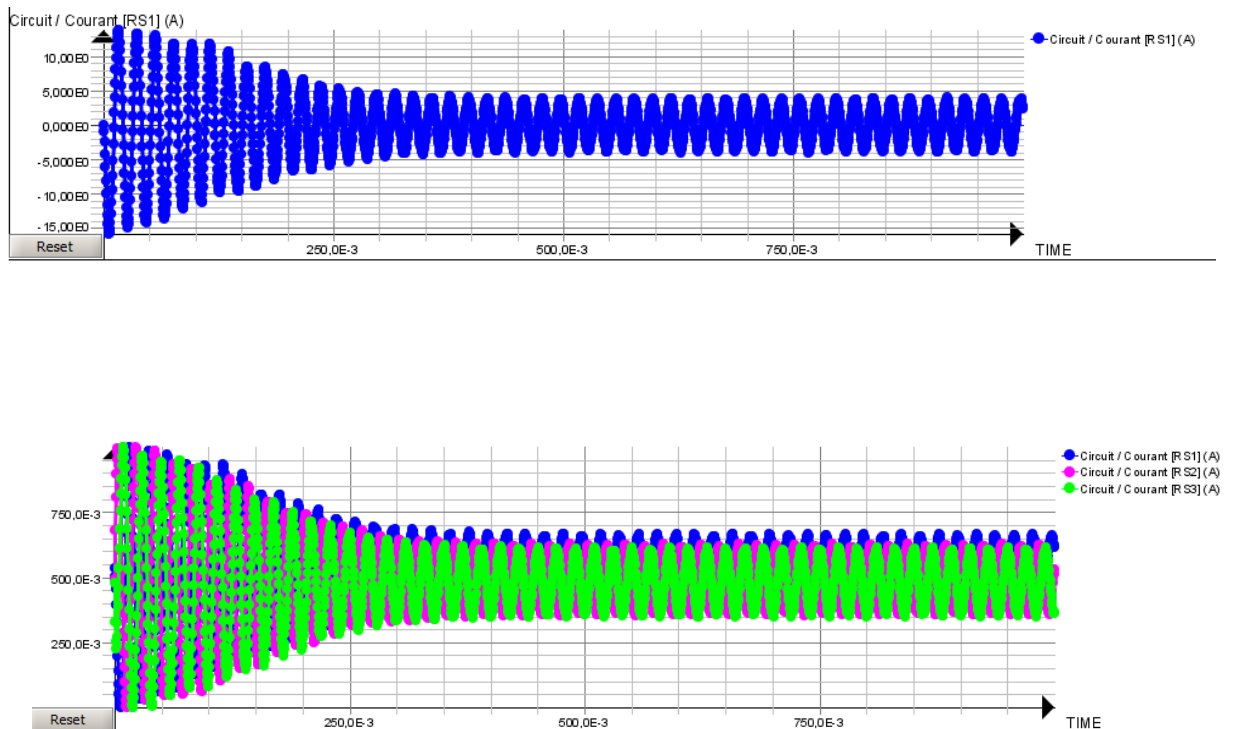


Figure3.5. Forme d'onde du courant statorique a vide a l'état sain

### 3.2.1 Interprétation des Résultats à vide :

D'après les courbes précédentes on constate que la vitesse au début atteint des pics très importants (1570tr/min), ensuite après une période de transition de 5 s elle se stabilise à la vitesse de synchronisme. On note aussi au démarrage une valeur importante du couple 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 du synchronisme où il se stabilise au voisinage de zéro puisqu'il n'y a pas de charge et les frottements sont négligés au démarrage. Pendant ce dernier on noté aussi le courant qui est d'environ 8 fois le courant nominale, les courants sont caractérisés par des pics très importants qui tendent vers leurs valeurs nominales 3,7A après le régime transitoire. les pics au démarrage sont expliqués 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).

### 3.2.2 Fonctionnement en charge :

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



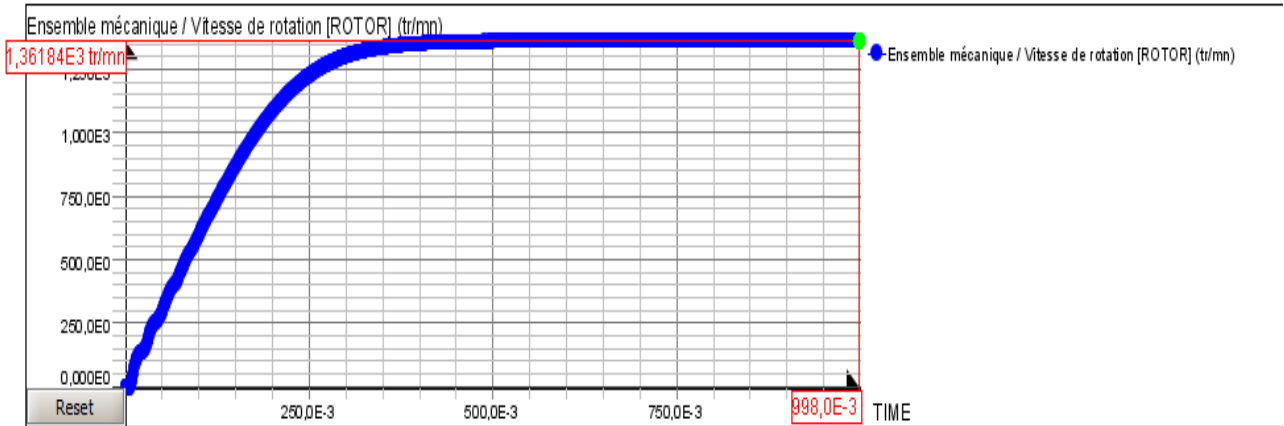


Figure3.6.Vitesse de rotation de la machine a l'état sain en charge de 10nm

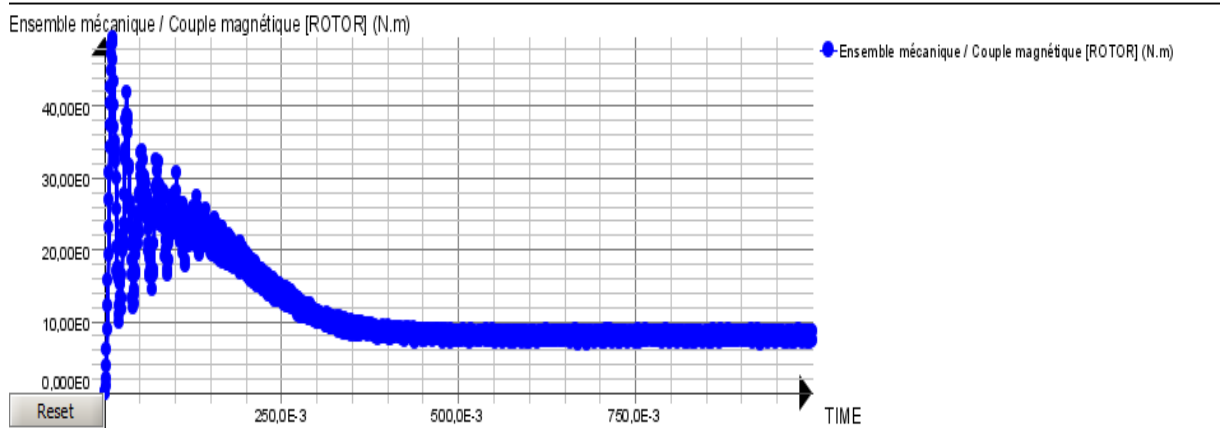


Figure.3.7. Couple électromagnétique de la machine sain en charge

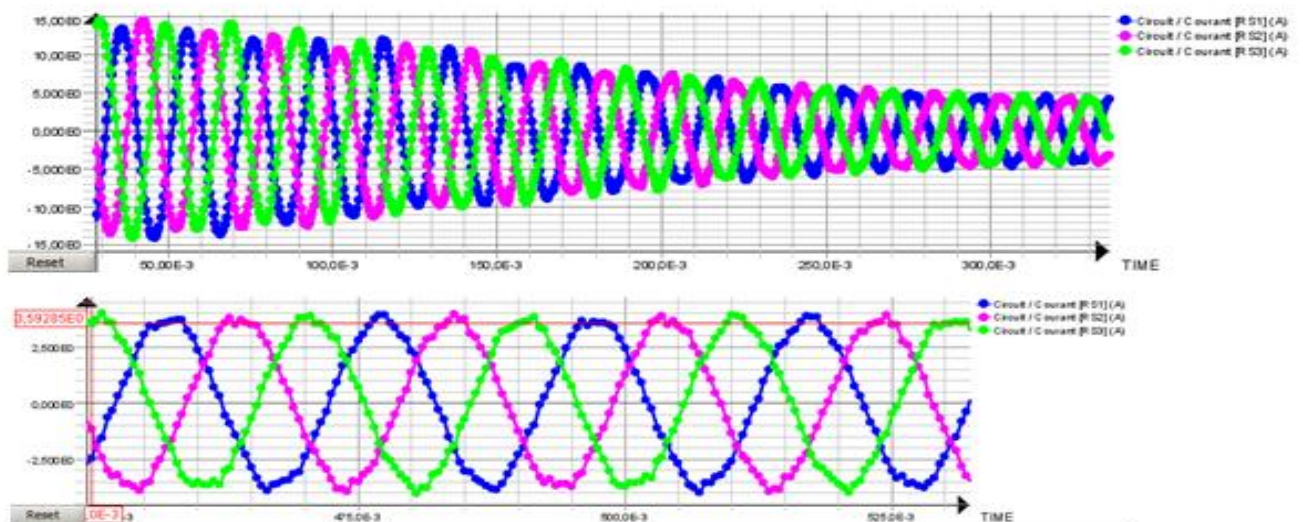


Figure.3.8. Forme d'onde du courant statorique a l'état sain en charge de 10nm

### 3.2.3 Résultats expérimentales à l'état sain en charge :

On constate une vitesse nominale de rotation du moteur qui est stabilisée après un temps de 0.36s 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.

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 bien qu'une augmentation du couple para port à l'état sain.

Les courants statorique sont caractérisés par des pics faibles qui tendent toujours vers leurs valeurs nominales.les courants se stabilise à une valeur de 5A après un temps de 0.3secondes cela dû à la charge appliqué et le régime transitoire caractérisé.

### 3.3 Résultat du Simulation de la MADA à l'état déséquilibrations de tension V1=180V :

Les résultats des simulations du comportement électrique, magnétique et mécanique d'une machine asynchrone qui a un défaut déséquilibration de tension sont présentés ci-dessus. Nous avons diminuée la valeur de la tension de la premier phase 380V vers 180V ceci peut être produit dans une machine réelle. Ce type de défaut influence considérablement le comportement mécanique de la machine par l'apparition des oscillations au niveau du couple 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 fondamental.

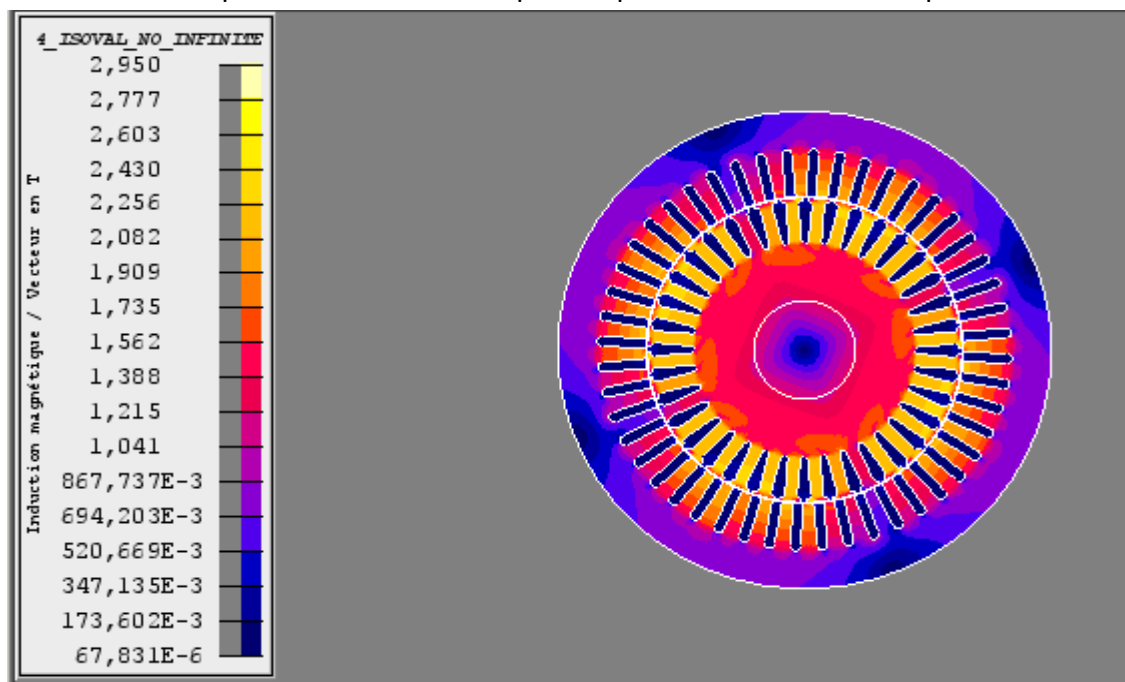


Figure 3.9. L'induction B à vide à l'état déséquilibrée

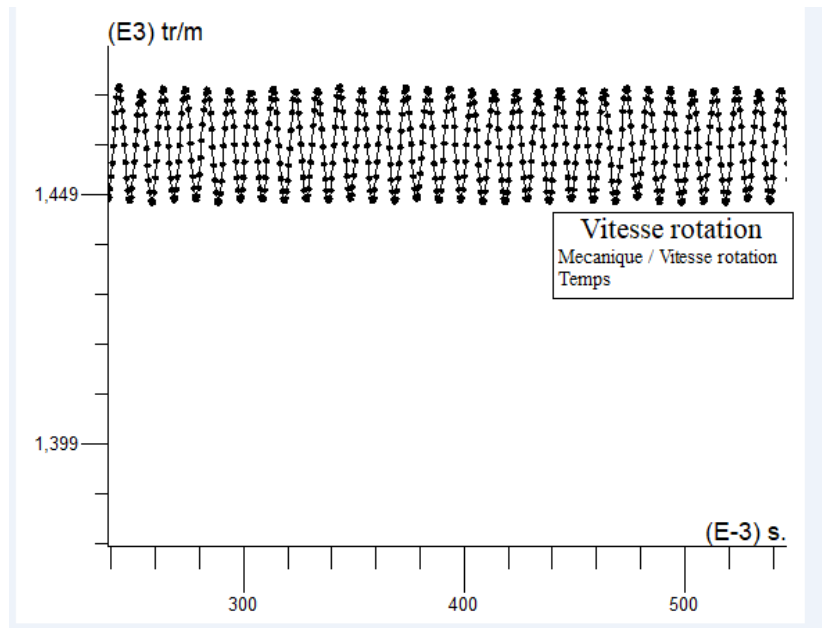
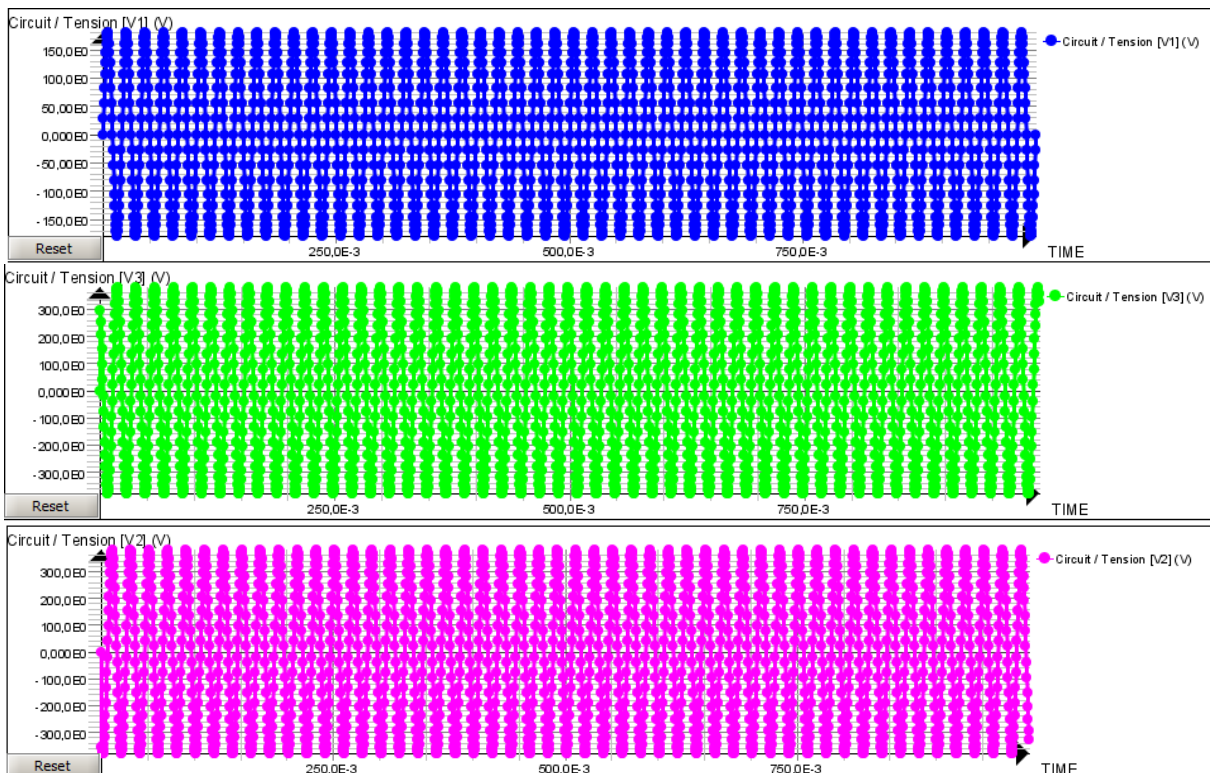


Figure3.10. La vitesse de rotation de la machine a l'état déséquilibrée a vide



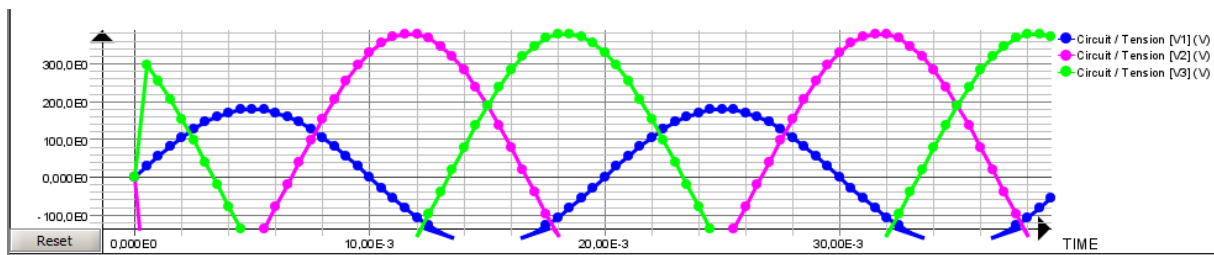


Figure3.11.Tension d'alimentation déséquilibré

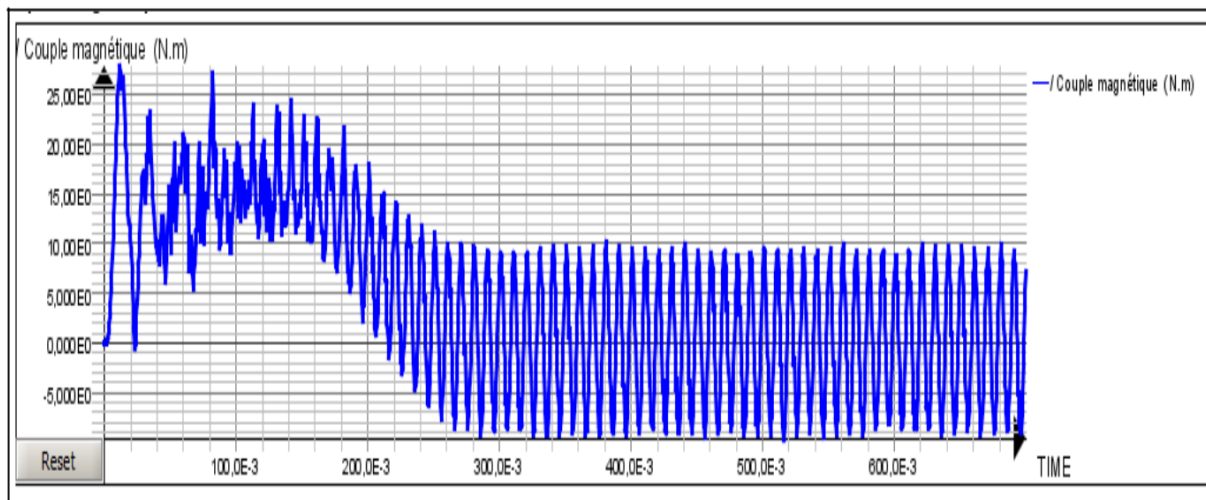


Figure3.12.Couple électromagnétique de la machine al 'état déséquilibrée avide

### 3.3.1Interprétation des résultats:

D'après la courbe, on remarque que sans avoir des pics de démarrage la vitesse atteint la valeur nominale, Après la disparition du régime transitoire l'allure de la Vitesse et de couple possèdent une augmentation dans l'amplitude des ondulations. la valeur moyenne du couple électromagnétique est réduite par la détérioration des tensions d'alimentation. Au niveau 2ème et 3ème phase on remarque on augmentation des courant statorique à cause de la diminution de la tension dans la 1ère phase.

### 3.3.2 Fonctionnement en charge on déséquilibre :

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

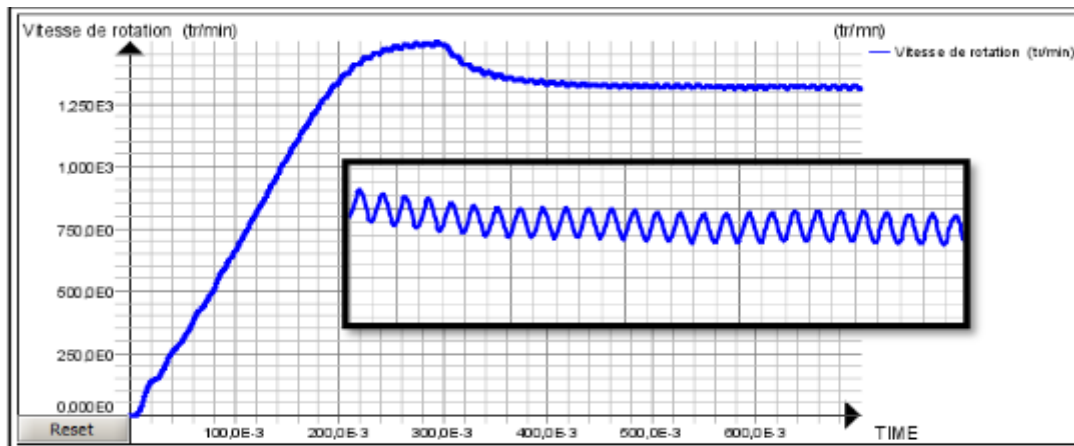


Figure3.13.La vitesse de rotation de la machine a l'état déséquilibrée en charge

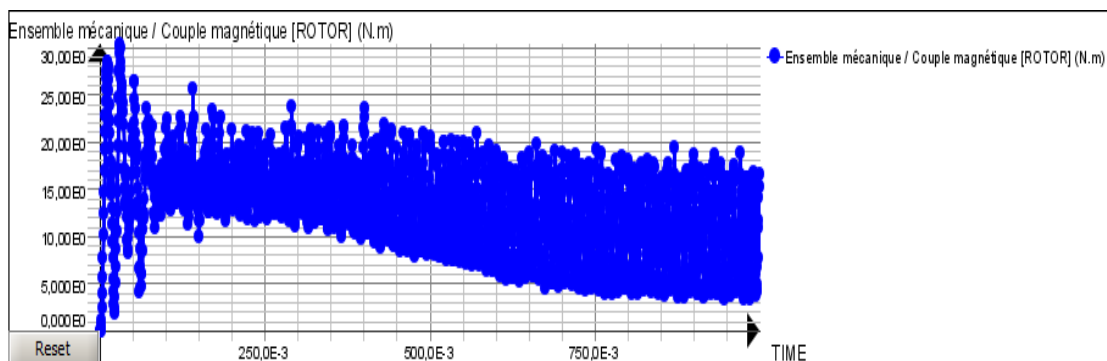


Figure3.14.Couple électromagnétique de la machine al 'état déséquilibrée en charge

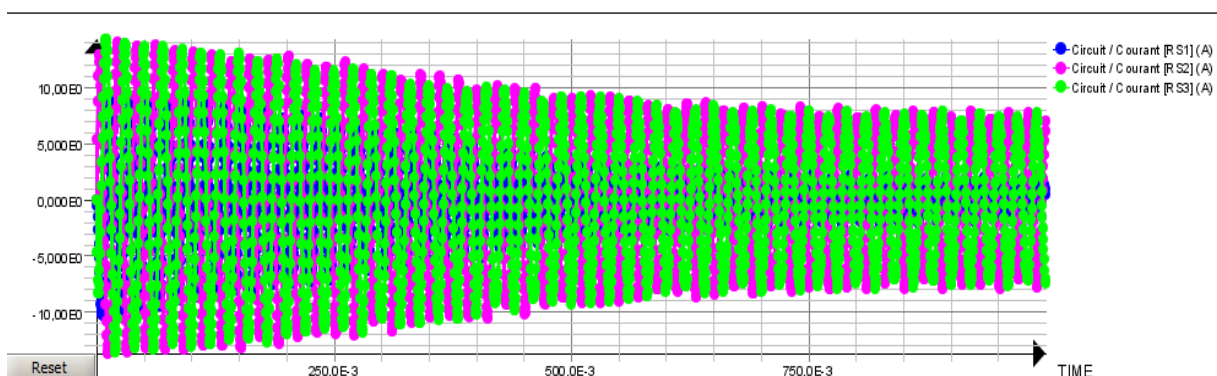


Figure 3.15. Représentation les courants statorique de la machine l'état déséquilibrée en charge

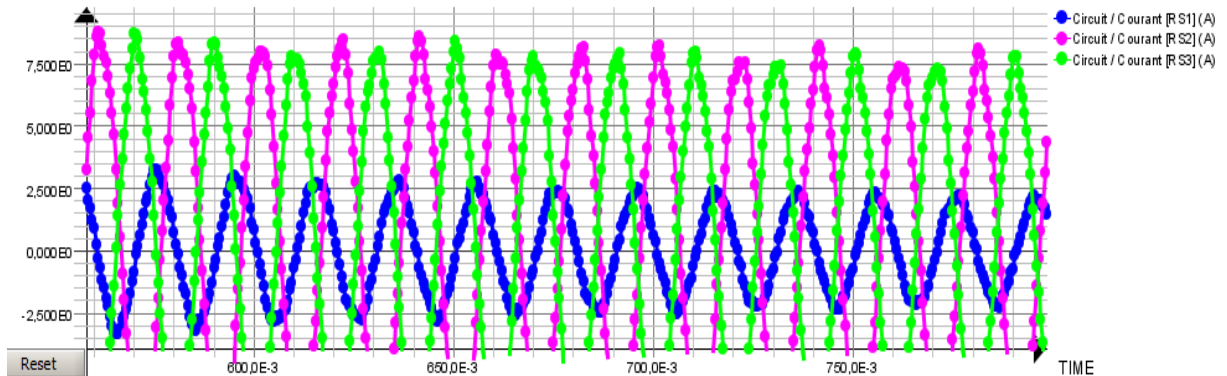


Figure 3.15. Représentation les courants statorique de la machine l'état déséquilibré en charge

### 3.3.3 Interprétation Déséquilibre en charge :

Dans ce cas l'effet de la charge a la présence du défaut déséquilibre au niveau du courbe de vitesse et couple électromagnétique est l'augmentation des amplitudes et des harmoniques. 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.

### 3.4 Résultat de l'analyse spectrale par FFT à l'état sain

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

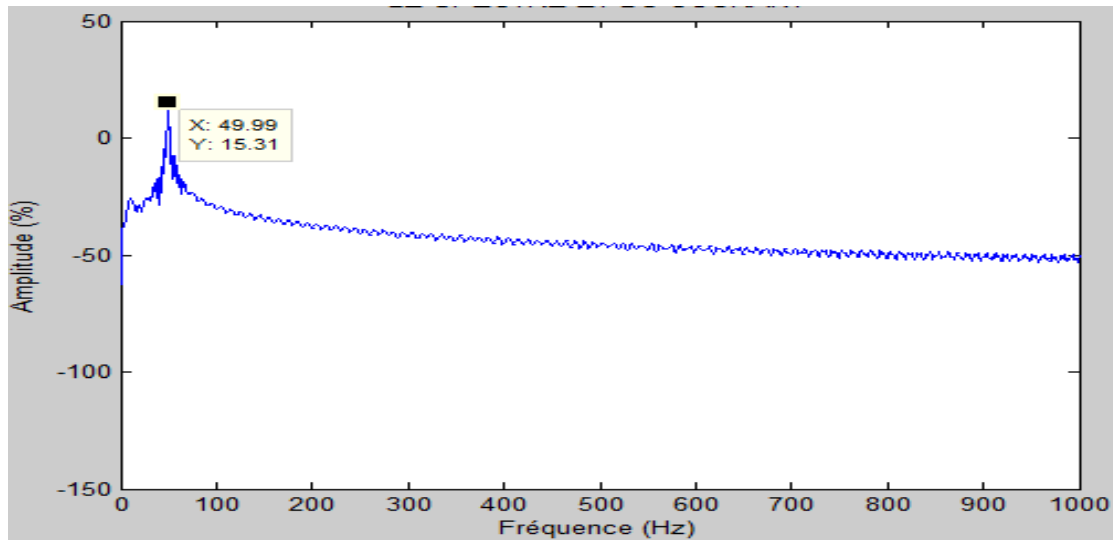


Figure 3.16. Le spectre de courant statorique vide avec tension équilibrée

### 3.5 Résultat de l'analyse spectrale par FFT à l'état déséquilibré :

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:

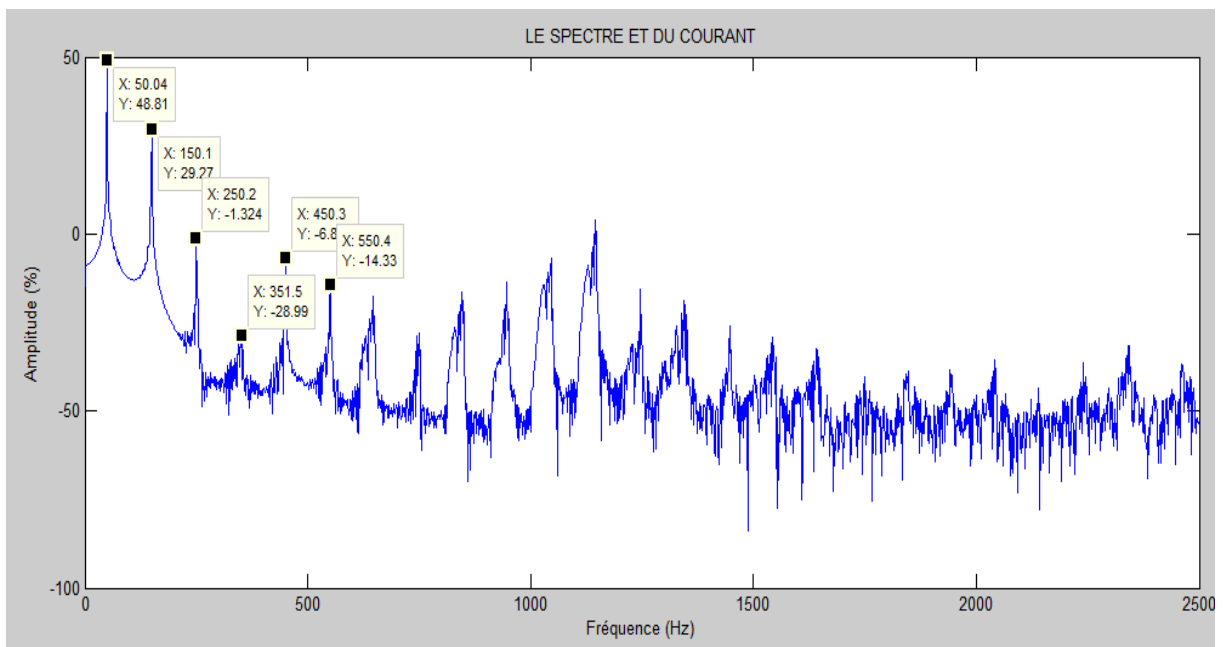
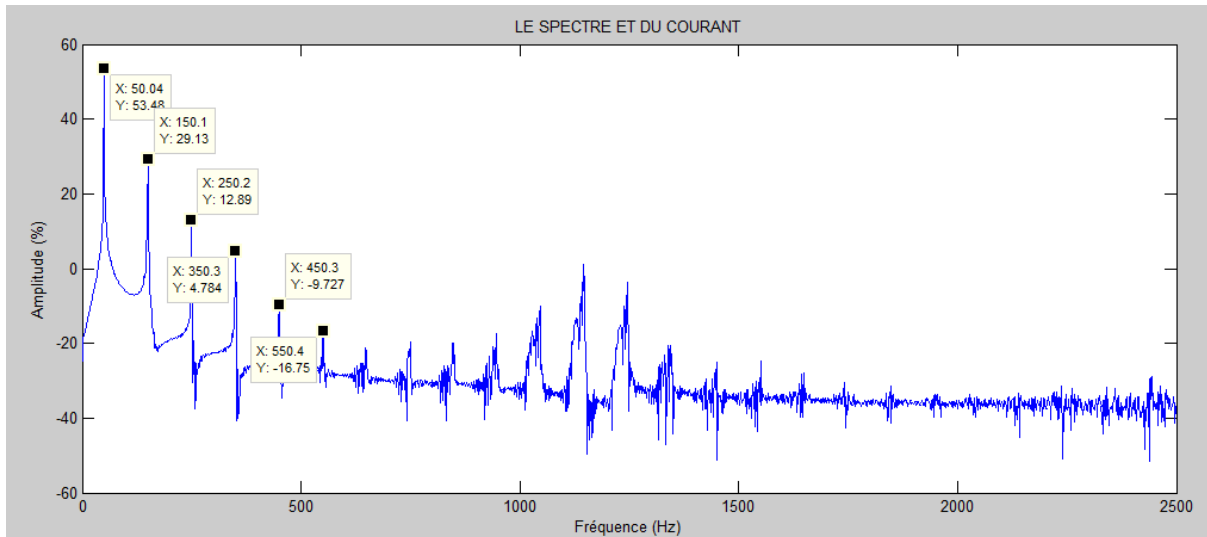


Figure 3.17 Le spectre de courant statorique 1<sup>er</sup> phase en charge avec tension déséquilibrée

On applique dans cette partie la transformé de Fourier rapide FFT sur le courant de la phase 2et 3 du moteur on obtient les résultats suivants:



**Figure 3.18** Le spectre de courant statorique 2et 3eme phase en charge avec tension déséquilibré

### 3.6 Interprétation de l'analyse spectrale

Pendant le fonctionnement de la MADA, des phénomènes diverses 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. À partir de ces deux spectres on peut dire que la pauvreté en harmoniques observée dans le spectre obtenu du modèle équilibré est absolument incomparable avec la richesse en harmoniques du spectre obtenu du modèle déséquilibré.

On remarque aussi l'émergence des harmoniques  $f_{dés}$  avec un accroissement de leurs amplitudes. ( $f_{dés} = K \cdot f_s$ )  $k = 1, 3, 5, \dots$

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



### 3.7 Conclusion :

Ce chapitre nous avons fait une l'élaboration des résultats du la simulation de la MADA pour l'état sain et déséquilibré en fonctionnement à vide et en charge sous l'environnement du logiciel Flux 2D. Malgré que cette modélisation soit très couteuse en temps de calcul, 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 statorique 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.

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale :

Le travail que l'on a présenté dans ce mémoire les 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. 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 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.

## Bibliographie

---

- [1] Nassireddine. et Layla , ( Control Des Puissances active Et Réactive De la MADA)(Université De Mohamed Boudiaf-M'sila) (2018)
- [2] Belkacem, T. O. U. A. L.( 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) (2010).
- [3] Nacre eddine, E.et Omar, E Modélisation etdiagnosticd'une MADA(mémoire de master université de Blida) (2019).
- [4]Somia,B.Dalila,B Commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production d'énergie éolienne(Mémoire de master, Université Ahmed Draïa Adrar.(2018).
- [5]Lotfi, KH. Lakhdar,M (Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée)( Mémoire De Master, Université badji mokhtar- annaba) (2017).
- [6]Armand BOYETTE,( Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne (Thèse de doctorat , de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1) (2006).
- [7]Youcef,B (Etude et Commande du Moteur Asynchrone à Double Alimentation(MADA) par Différentes Techniques Avancées (Mémoire de Magister, CentUniversitaire d'El-oued Institut de Sciences et Technologie) .(2010).
- [8] Salloum, G , Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation (Doctoral dissertation, Toulouse, INPT). (2007).
- [9] Elbia.Yousef, <commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à double alimentation et à flux orienté>, Thèse Magistère, Université de Batna, 15 Juin 2009.
- [10] Ahlem,B. Zahraa,B Étude et Simulation de la Machine Asynchrone Double Alimentée (MADA)(mémoire de master, Université Larbi Ben M'hidi de oum Ebouaghile) .(2012)

## Bibliographie

---

[11] A. Nadia, <contribution a l'alimentation de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone a double alimentation >, thèse de doctorat, Université de Batna, 02 juin 2010.

[12] L. REFOUFI, B.A.TAL.AL ZAHAWI, A.G. JACK « Analysis and modeling of the steady state behavior of the static Kramer induction generator »; IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume 14, Issue 3, 1999, pp 333-33

[13] khettache « étude et commande d' un système éolien à base d' une machine électrique double alimentée » ; mémoire de magistère en électrotechnique , faculté des sciences de l' ingénieur, université de Batna, 2007 .

[14] F. Poitiers, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne". Thèse de doctorat, , Université de Nantes, France 2003

[15]Rabah Sadaoui ; Analyse et commande de la machine asynchrone à double alimentation , L' université du Québec à Trois-Rivières ,. (domaine d application) Avril 2017

[16]B. Mohamed Lami , B. Salah, Evaluation des pertes d'une machine asynchrone double alimentation en défaut de court-circuit par la Méthode des éléments finis, Mémoire de Master, Université SAAD DAHLAB de BLIDA(Défaillances dans les machine asynchrone)

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

[18]D. Abdelhakim, Z. Abdessamie , Modélisation et diagnostic d'une MADA fonctionnant en régime déséquilibré, Mémoire de Master ,Université Saad Dahlab de Blida ;2017-2018

### (. Classification des défauts)

[19]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.

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

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

## Bibliographie

---

[22] 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.

[23] 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.

[24]: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. 1016-1021.1992, pp. 376-380.

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

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

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

[28] Jawad faiz, University of Tehran Locating rotor broken bars in induction motors using finite element method, ARTICLE in ENERGY CONVERSION AND management, january 2009

[29] B. Ammar ; (diagnostic de la machine asynchrone par la méthode d'identification paramétrique) ; Université de M'silla ; diplôme d'ingénieur d'état ; Année 2012

[30] M. Khov, Surveillance et diagnostic des machines synchrones à aimants permanents Détection des courts-circuits par suivi paramétrique, thèse de doctorat, université de Toulouse,2009

[31] Y. Nacera, Modélisation des machines asynchrones dédiée au diagnostic des défauts de court circuit inter- spires et des cassures de barres et d'anneaux, Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2009.

## Bibliographie

---

[32]: B.Sadok ; (Conception et implémentation d'un méta-modèle de machines asynchrones en défaut) ; thèse de doctorat ; Université de Poitiers ; Année 2009.

[33]M. Bouray Islam , Réalisation de cas de démo Flux accessibles depuis superviseur, Master Ingénierie Electrique Electronique et Informatique Industrielle Spécialité « Energie électrique , Université de Lorraine Faculté des Sciences et Technologies, 12/09/2014.

[34] J. A. Farouk, Etude du problème inverse en électromagnétisme en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents, thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2008

[35] D.Hussein , Méthodologie de Conception des Machines Synchrones à Aimants Permanents - Application au Véhicule Electrique avec Chargeur Rapide Embarqué, thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2013.

[36]A.Ceban, Méthode globale de diagnostic des machines électriques, thèse de doctorat, Université d'Artois, 2012

[37]A.Assam « Identification des Machines Asynchrones en Vue de Leurs diagnostics » ,Thèse de magister de l'Université de Sétif,2010.

[38]C.Labiod, « Modélisation des phénomènes électromagnétiques dans une machine à reluctance variable », thèse de Magister université de Biskra, 2014

[39]A.Assam « Identification des Machines Asynchrones en Vue de Leurs diagnostics » ,Thèse de magister de l'Université de Sétif,2010.

[40]IT MIHOUB Mohamed oulhocine, Méthode globale de diagnostic des machines asynchrones a cage d'écureuil , du diplôme master en génie électrique , Université de Mohamed Boudiaf- m'sila faculté des sciences et de la technologie ,2015/2016.