

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

Mention Électronique
Spécialité Machine électrique

présenté par

DJOUADI Abdelhakim

&

ZEROUG Abdessamie

Modélisation et diagnostic d'une MADA fonctionnant en régime déséquilibré

Proposé par:

D.KOUCHIH

R.HACHELAF

Année Universitaire 2017-2018

Remerciements

Nos remerciements vont premièrement à **Dieu** tout puissant pour la volonté, la Santé, et la patience, qu'il nous a données durant toutes ces années d'étude.

Nous exprimons nos profondes gratitudes à nos parents pour leurs encouragements, leur soutien et pour les Sacrifices qu'ils ont endurés. Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur **Dr D. Kouchih** pour suivi tout le long de la réalisation de ce mémoire, et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils et remarques.

Nos remerciements vont également le Co-promoteur M. **R. Hachelaf** pour son attention et son suivi.

Nos sincères remerciements à messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en participant au jugement de ce travail.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département de génie électrique.

Sans oublier les jeunes étudiants et nos collègues qui, durant ces années, ont entretenu une très bonne ambiance et ont fait preuve de solidarité. Nous souhaitons aux eux du succès dans leurs recherches ainsi que dans leurs vies professionnelles.

*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
Ardu.
Et nos frères.
Et nos sœurs.
Et nos collègues.
Et à tous mes amis.
Et tous les personnes qui ont participé de près ou de loin à la
réalisation de ce travail.*

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 .
ومن بين هذه الأخطاء نذكر: توصيل التغذية رديء وانخفاض الطاقة في أحد الأطوار.
في هذا السياق ، اقترحنا طريقتين: المحاكاة والدراسة التجريبية التي تستند إلى تطبيق تقنية معالجة (التحليل الطيفي في الجزء الثابت للتيار) هذا هو الحل الأكثر فعالية لحل خلل التوازن.

كلمات المفاتيح: الآلات الكهربائية غير المتزامنة ذات تغذية مزدوجة; التحليل في الجزء الثابت الطيفي للتيار; خلل التوازن; تشخيص

Résumé :

Notre travail consiste à diagnostiquer des défauts de la machine asynchrones à double alimentation(MADA), pour protéger la machine, afin de prolonger la durée de la fiabilité et d'améliorer ses performances et son rendement. Parmi ces défauts, on trouve: mauvaise connectivité d'alimentation, chute de tension dans une phase.

Dans ce contexte, nous avons proposé deux approches: la simulation et l'étude expérimentale qui sont basés sur l'application de technique de traitement signal (l'analyse spectrale du courant statorique FFT), c'est une solution la plus efficace pour détecter le défaut de déséquilibre.

Mots clés : machine asynchrones à double alimentation; l'analyse spectrale du courant statorique FFT ; défaut de déséquilibre; diagnostic.

Abstract :

This work focuses on the diagnosis of faults in the Doubly Fed Induction Machine (DFIM), to protect the machine, to extend the reliability time and improve its performance. These defects include: poor power connectivity, voltage drop in one phase.

In this context, we have proposed two approaches: the simulation and the experimental study which are based on the application of signal processing technique (the spectral analysis of the stator current using FFT), it is a most effective solution to solve the unbalanced faults.

Keywords : Doubly Fed Induction Machine; the spectral analysis of the stator current using FFT; unbalance fault; diagnosis.

Listes des acronymes et abréviations

N_1 : vitesse de synchronisme

F_s : fréquence statorique

P : nombre paire de pole

g : glissement

N : vitesse de rotation

Ω_s : vitesse de synchronisme

Ω : vitesse de rotation

ω_s : pulsation statorique

N_b : nombre de barres rotorique

P_s : puissance active statorique

Q_s : puissance réactive statorique

C_e : couple électromagnétique

P_r : puissance rotorique

$P_{méc}$: puissance mécanique

E : champs électrique

B : induction magnétique

H : champ magnétique

J : densité de courant

D : induction électrique

q : charge volumique

μ : perméabilité

σ : conductivité électrique

ρ : densité de charge

Table des matières

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre 1 Généralités sur les machines asynchrones

1.1. Introduction.....	3
1.2 Machine asynchrone.....	3
1.2.1 Définition	3
1.2.2. modes de fonctionnement	3
1.3. Constitution de la machine asynchrone	4
1.3.1. Le stator.....	4
1.3.2. Le rotor.....	5
1.3.3. Principe de fonctionnement.....	5
1.3.4. Différentes caractéristiques de la machine asynchrone.....	6
1.4 Différents types des moteurs asynchrones	7
1.4.1 Moteur asynchrone à cage.....	7
1.4.1.1 Constitution et Principe de fonctionnement	7
1.4.1.2 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone à cage.....	8
1.4.2 Moteur asynchrone à rotor bobiné	8
1.4.2.1 Constitution et Principe de fonctionnement	8
1.4.2.2 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone à rotor bobiné.....	9
1.5 Machine asynchrone a double alimentation	9
1.5.1 Description.....	9
1.5.2. Classification	10
1.5.2.1 .Machine à double alimentation simple	11
1.5.2.2. Machine à double alimentation en cascade	11
1.5.2.3. Machine à double alimentation cascade à un repère	12
1.5.2.4. Machine à double alimentation sans collecteur	12
1.6. Etude du fonctionnement en génératrice	13
1.7. Etude de fonctionnement en moteur	14

1.7.1. Premières configurations : Stator alimenté par le réseau, rotor alimenté par un onduleur	14
1.7.2. Deuxième configuration : Stator relié au réseau, rotor alimenté par un Cycle convertisseur	15
1.7.3. Troisièmes configurations : Stator alimenté par onduleur, rotor alimenté par un onduleur	16
1.8. Régimes de fonctionnement de la MADA	16
1.8.1 Stationnaire ($g=1$).....	16
1.8.2 Hypo synchrone ($0 < g < 1$).....	16
1.8.3 Synchrone ($g=0$)	16
1.8.4 Hyper synchrone ($g < 0$)	17
1.9. Transfert de puissance dans la MADA.....	17
1.10 défauts des machines triphasée	19
1.10.1. Classification des défauts	19
1.11. principaux défauts liés à la MAS.....	21
1.11.1. Le déséquilibre de tension et de courant	21
1.11.2. Ruptures des barres rotorique	21
1.11.3. Court-circuit au niveau du stator.....	22
1.11.2.1. Court-circuit entre spires	22
1.11.2.2. Court-circuit entre phases	22
1.12. Transformée de Fourier rapide (FFT).....	22
1.13. Effets des défauts électriques sur les courants statoriques	23
1.13.1. Le déséquilibre de tension et de courant.....	23
1.13.2. Ruptures des barres	24
1.13.3 Court-circuit au niveau du stator.....	24
1.14. Etudes statistique des défaillances de la machine asynchrone.....	24
1.15. Conclusion.....	26

Chapitre 2 Modélisation de la MADA

2.1. Introduction.....	27
2.2 Conception assisté par ordinateur CAO.....	27
2.2.1 Définition de CAO	27

2.2.2 Historique de CAO	27
2.3. Les équations de Maxwell.....	28
2.3.1 Introduction	28
2.3.2 Les équations	28
2.3.2.1 Equation de Maxwell-Faraday.....	28
2.3.2.2 Equation de Maxwell-Ampère.....	28
2.3.2.3 Equation de conservation de flux magnétique.....	28
2.3.2.4 Equation de Maxwell-Gauss	29
2.3.3 Les problématiques	29
2.3.3.1 Problème statique.....	29
2.3.3.2 Problème dynamique	31
2.4 Les méthodes numériques.....	32
2.4.1 Méthode des différences finis	32
2.4.2 Méthode des éléments finis.....	33
2.4.2.1 Implémentation de la méthode des éléments finis.....	34
2.4.2.2 Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis.....	35
2.5 Logiciel FLUX-2D.....	35
2.5.1 Introduction	35
2.5.2 Définition	35
2.5.3 La résolution d'un problème.....	36
2.5.3.1 Module préprocesseur.....	36
2.5.3.2 Module processeur.....	36
2.5.3.3 Module post-processeur de Flux-2D (PostPro_2D).....	36
2.6 Conclusion	38

Chapitre 3

Résultats de simulation de la MADA

3.1 Introduction.....	39
3.2 Structure du circuit magnétique de la machine.....	39
3.3 Phase de préparation.....	40
3.4 Structures des bobinages d'une MADA.....	41

3.5 Création des matériaux	43
3.6 Circuit électrique	43
3.7 Le maillage.....	44
3.8 Simulation du modèle élément finis.....	46
3.9 Résultat de simulation de fonctionnement à vide	46
3.9.1 Tension équilibré.....	47
3.9.2 Tension déséquilibré	48
3.9.3 Interprétation des résultats.....	50
3.9.4 Résultat de l'analyse spectrale par FFT.....	51
3.9.5 Interprétation de l'analyse spectrale	52
3.10 Résultat de simulation de fonctionnement en charge.....	52
3.10.1 Tension équilibré.....	52
3.10.2 Tension déséquilibré	54
3.10.3 Interprétation des résultats.....	56
3.10.4 Résultat de l'analyse spectrale par FFT.....	57
3.10.5 Interprétation de l'analyse spectrale.....	59
3.11 Conclusion.....	59

Chapitre 4 Etude expérimentale

4.1 Introduction.....	60
4.2 Campagnes d'Essais et Description.....	60
4.3 Les étapes de réalisation de la technique du diagnostic.....	61
4.4 Description de Matériel.....	61
4.4.1 L'alimentation	61
4.4.2 Analyseur de qualité d'énergie	62
4.4.3 Oscilloscope.....	63
4.4.5 Transformateur	63
4.4.6 La résistance variable	64
4.4.7 Machine à courant continu	64
4.4.8 Machine à rotor bobiné.....	65
4.5 Résultat de simulation de fonctionnement à vide	65
4.5.1 Tension équilibre	65

4.5.2 Tension déséquilibré	66
4.5.3 Interprétation des résultats.....	67
4.5.4 Résultat de l'analyse spectrale par FFT.....	68
4.5.5 Interprétation de l'analyse spectrale.....	69
4.6 Résultat de simulation de fonctionnement en charge.....	69
4.6.1 Tension équilibré.....	69
4.6.2 Tension déséquilibré.....	70
4.6.3 Interprétation des résultats.....	72
4.6.4 Résultat de l'analyse spectrale par FFT.....	73
4.6.5 Interprétation de l'analyse spectrale.....	74
4.7 Synthèse des techniques du diagnostic utilisées.....	74
4.8 Conclusion.....	75
Conclusion générale	76
Annexe	78
Bibliographie	83

Table des figures

Figure .1.1. Photo du stator d'une machine asynchrone.....	4
Figure .1.2. Interaction rotor stator.....	6
Figure1.3. Schéma d'alimentation typique de la MADA.....	10
Figure1.4. classification de la MADA.	10
Figure 1.5. Schéma de principe de la machine à double alimentation simple.....	11
Figure 1.6. Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade.....	11
Figure 1.7. Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade à un repère.....	12
Figure1.8. Schéma de principe de la machine à double alimentation sans collecteur.....	12
Figure 1.9. Schéma de l'alimentation de la MADA pour application génératrice.....	13
Figure 1.10. Schéma de l'alimentation de la MADA.....	14
Figure 1.11. Schéma de l'alimentation de la MADA pour application moteur deuxième configuration.....	15
Figure 1.12. Schéma de l'alimentation de la MADA pour application moteur deuxième Configuration.....	15
Figure 1.13. Les régimes de fonctionnement de la MADA.....	16
Figure 1.14. Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double Alimentation.....	19
Figure 1.15. Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.....	20
Figure 1.16. Causes <i>externes</i> de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.....	20
Figure 1.17. Principe de la Transformée de Fourier.....	23
Figure 1.18. Répartition des défauts.....	24
Figure 1.19. Répartition des causes des défauts pour une machine asynchrone.....	25
Figure 1.20. Facteur aggravant le défaut.....	25
Figure 2.1. Organisation du logiciel	34.
Figure 2. 2. Schéma des différents modules du logiciel Flux-2D.....	37
Figure 3.1. Structure du circuit magnétique et caractérisation de la géométrie de la MADA.....	39
Figure 3.2. (a) Régions du domaine de calcul du champ électromagnétique.....	40
Figure 3.2.(b) Zoom de Régions du domaine de calcul du champ électromagnétique région.....	41
Figure 3.3. Bobinage triphasé représente deux pas polaires.....	42

Figure 3.4. Répartition du bobinage statorique.....	42
Figure 3.5. Caractéristiques B(H) du matériau magnétique.....	43
Figure 3.6. Représentation de circuit électrique.....	44
Figure 3.7. Répartition du maillage dans l'entrefer.....	44
Figure 3.8. Le maillage effectué sur le circuit magnétique de la machine.....	45
Figure 3.9. Répartition des lignes équiflux.....	46
Figure 3.10. L'induction magnétique.....	46
Figure 3.11. Courbe de la vitesse.....	47
Figure 3.12. Courbe du couple et des courants rotoriques.....	47
Figure 3.13. Représentation les courants statorique superposé.....	48
Figure 3.14. Courbe de la vitesse.....	48
Figure 3.15. Courbe du couple.....	49
Figure 3.16. Représentation les courants statorique superposé.....	49
Figure 3.17. Représentation les courants rotorique superposé.....	50
Figure 3.18. Les spectres du courant statorique à vide avec tension équilibré.....	51
Figure 3.19. Les spectres du courant statorique à vide avec tension déséquilibré.....	51
Figure 3.20. Courbe de la vitesse.....	52
Figure 3.21. Courbe du couple.....	53
Figure 3.22. Représentation les courants statorique superposé.....	53
Figure 3.23. Représentation les courants rotorique superposé.....	54
Figure 3.24. Courbe de la vitesse.....	54
Figure 3.25. Courbe du couple.....	55
Figure 3.26. Représentation les courants statorique superposé.....	55
Figure 3.27. Représentation les courants rotorique superposé.....	56
Figure 3.28. Les spectres du courant statorique en charge avec tension équilibré.....	57
Figure 3.29. Les spectres du courant statorique en charge avec tension déséquilibré.....	57
Figure 3.30 . Le spectre de la vitesse en équilibrage.....	58
Figure 3.31. Le spectre de la vitesse en déséquilibrage	58
Figure 4.1. Configuration du banc expérimental.....	60
Figure 4.2. Banc d'Essai.....	61
Figure 4.3 . Représente bloc d'alimentation.....	62
Figure 4.4. Représente l'analyseur de qualité d'énergie.....	62

Figure 4.5.Représente oscilloscope numérique.....	63
Figure 4.6.Représente les enroulements primaire et secondaire de transformateur.....	63
Figure 4.7.Représente la résistance variable.....	64
Figure 4.8.Représente les borne d'alimentation de la MCC.....	64
Figure 4.9.Représente les borne d'alimentation de la MRB.....	65
Figure 4.10. Représentation des tensions statorique équilibré.....	65
Figure 4.11.Représentation des courants statorique équilibré.....	66
Figure 4.12.Représentation l'équilibrage des courants statorique équilibré.....	66
Figure 4.13.Représentation des tensions statorique déséquilibré.....	66
Figure 4.14.Représentation des courants statorique déséquilibré.....	67
Figure 4.15.Représentation des courants statorique déséquilibré.....	67
Figure 4.16.Les spectres du courant statorique à vide équilibré.....	68
Figure 4.17.Les spectres du courant statorique à vide déséquilibré.....	68
Figure 4.18.Représentation l'équilibrage des courants statorique.....	69
Figure 4.19.Représentation des courants statorique.....	70
Figure 4.20.La vitesse en fonction de tempe.....	70
Figure 4.21.Représentation des courants statorique.....	71
Figure 4.22.Représentation l'équilibrage des courants statorique.....	71
Figure 4.23.La vitesse en fonction de tempe.....	72
Figure 4.24.Les spectres du courant statorique en charge avec tension équilibré.....	73
Figure 4.25. Les spectres du courant statorique en charge avec tension déséquilibré.....	73
Figure 4.26. Synthèse du diagnostic étudié.....	75

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Avantages et inconvénients de la machine asynchrone à cage.....	8
Tableau 1.2. Avantages et inconvénients de la machine asynchrone à rotor bobiné.....	9
Tableau 2.1. Avantages et inconvénients de la méthode des différences finis.....	32
Tableau 2.2. Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis.	35
Tableau 4.1. Les tensions et les courants dans les trois lignes.....	69
Tableau 4.2. Les tensions et les courants dans les trois lignes.....	70

Les machines électriques sont l'élément le plus important dans l'industrie à savoir la production et les entraînements électriques. La machine asynchrone est la plus simple à fabriquer, la moins coûteuse et la moins exigeante en termes d'entretien, elle est fabriquée en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances,

Actuellement la machine asynchrone est de plus en plus utilisée pour effectuer la variation de vitesse ou du positionnement. La plupart des équipements industriels sont à base sur cette machines comme l'aéronautique, le nucléaire, les industries pétroliers, chimiques, dans le transport (métro, trains, propulsion de véhicule et des navires, les ascenseurs), dans l'industrie (machines outils, treuils) et dans l'électroménager. A l'origine, elle était utilisée uniquement comme moteur, mais grâce à l'électronique de puissance, elle est de plus en plus utilisée comme génératrice,

Malgré toutes ces avantages, les machines asynchrones restent sensibles à des multiples perturbations de l'environnement aux quelles elles sont soumises.

Les défauts dans les machines asynchrone peuvent être d'origine mécanique (excentricités du rotor, défaut sur les accouplements, corrosion des roulements,...), électrique (court-circuit du bobinage statorique, rupture de barres rotoriques ou d'anneau,...). C'est pour cette raison que la surveillance des machines est importante dans le monde industriel, cette dernière englobe la détection et le diagnostic des défaillances. Le diagnostic de défauts à pour rôle la localisation (déterminer quelle partie du système est effectuée) et l'identification de ce défaut (quantification du défaut).

Dans ce contexte, on à abordé le sujet de 'modélisation et diagnostic d'une MADA fonctionnement en régime déséquilibre'. Notre travail s'intéresse à la détection de défauts de déséquilibre.

Pour mener cette étude, le mémoire est structuré en quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré aux démarches classiques d'analyse les principaux éléments constitution la machine asynchrone, son principe de fonctionnement et une étude statique qui présente les défauts qui peuvent se produire.

Ainsi nous avons présenté la MADA, son principe de fonctionnement, classification, comparaison entre la différente variante, régime de fonctionnement et transfert de puissance.

Dans le deuxième chapitre, on a présenté la modélisation de la MADA pour la résolution des équations des champs électromagnétique. On à passe par conception assisté par ordinateur CAO, En suite, on a cité les modèles mathématiques des équations de Maxwell, même la méthode des éléments finis est basée sur la résolution numérique des équations de Maxwell, et on a terminé par le logiciel Flux 2D.

Dans le troisième chapitre, nous avons étudiés la MADA dans les deux cas de fonctionnement : à vide et en charge et dans le cas d'une machine saine (sans défaut) et avec déséquilibre de réseau.

Dans le quatrième chapitre nous avons employé les expériences précédentes dans un cas pratique pour voir les résultats d'un phénomène ou bien pour faire une étude comparative avec la réalisation de l'expérience sur l'élément réel et les résultats de simulation.

A la fin une conclusion générale ou on à présenté une synthèse des résultats obtenus.

1.1 Introduction

La machine asynchrone est très utilisée dans les applications industrielles, à cause de sa conception, et son cout qui 'est relativement moins cher à celui des autres machines, sa grande robustesse au niveau électromagnétique, et sa bonne standardisation entre les différents fabricants. Cependant, la conception simple de cette machine cache une complexité fonctionnelle assez importante.

Depuis longtemps, la machine asynchrone à été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance.

1.2 Machine asynchrone

1.2.1. Définition

Une machine asynchrone est une machine à courant alternatif pour la quelle la vitesse de rotation de l'arbre est différente de la vitesse de rotation du champ tournant. Il existe en effet théoriquement d'autres types de machines asynchrones. La machine asynchrone est une machine à induction dont le circuit magnétique est associé à deux, ou plus de deux, circuits électriques se déplaçant l'un par rapport à l'autre et dans lequel l'énergie est transférée de la partie fixe à la partie mobile, ou inversement, par induction électromagnétique. Cependant, la seule machine asynchrone qui ait une importance pratique est la machine à induction [1].

1.2.2. Modes de fonctionnement

Dans les machines électriques peuvent être trouvées en deux modes de fonctionnement.

- Générateurs : qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Moteurs : qui transforment l'énergie électrique en énergie mécanique.

Le moteur asynchrone (ou moteur d'induction) permet la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique.

1.3. Constitution de la machine asynchrone

1.3.1. Le stator

Le stator de la machine asynchrone est constitué des tôles d'acier dans les quelles sont placés les bobinages statoriques (*Figure 1.2*). Ces tôles sont pour les petites machines, découpées en une seule pièce alors qu'elles sont pour les machines de puissance plus importante, découpées par sections.

Elles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Au final, elles sont assemblées les unes aux autres à l'aide de boulons ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique.

Une fois cette étape d'assemblage terminée, les enroulements statoriques sont placés dans les encoches prévues à cet effet. Ces enroulements peuvent être insérés de manière imbriqués, ondulés ou encore concentriques. L'enroulement concentrique est très souvent utilisé lorsque le bobinage de la machine asynchrone est effectué mécaniquement. Pour les grosses machines, les enroulements sont faits de méplats de cuivre de différentes sections insérés directement dans les encoches.

L'isolation entre les enroulements électriques et les tôles d'acier s'effectue à l'aide de matériaux isolants qui peuvent être de différents types suivant l'utilisation de la machine asynchrone. Le stator d'une machine asynchrone est aussi pourvu d'une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique [1].

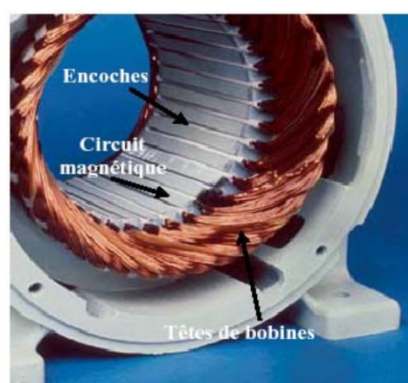


Figure 1.1: Photo du stator d'une machine asynchrone.

1.3.2. Le rotor

C'est l'élément mobile du moteur. Se compose d'un cylindre fait de tôles empilées. Des encoches sont percées à la périphérie extérieure destinées à recevoir des conducteurs. Il est séparé du stator par un entrefer très court de l'ordre de 0,4 à 2 mm, Il existe : le rotor à cage d'écureuil et le rotor bobiné.....)[1].

1.3.3. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'une machine asynchrone est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant.

De cette façon le fonctionnement d'une machine asynchrone est analogue à celui d'un transformateur: le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire qui, dans le cas général , peut tourner à la vitesse de rotation donnée par le rapport suivant:

$$n_s = \frac{f \times 60}{p} \quad (\text{Eq 1.1})$$

L'interaction électromagnétique des deux parties d'une machine asynchrone (sans collecteur) n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant (n_1) diffère de celle du rotor (n), c'est-à-dire, lorsque $n \neq n_s$, car dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque $n = n_s$, le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique.

Le rapport :

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (\text{Eq 1.2})$$

1.3.4. Différentes caractéristiques de la machine asynchrone

Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique B_1 tournant à la pulsation de synchronisme :[5].

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (\text{Eq 1.3})$$

Ω_s : vitesse synchrone de rotation du champ tournant en rad/s. ω_s : Pulsation des courants alternatifs en rad/s.

$$\omega_s = 2\pi f \quad (\text{Eq 1.4})$$

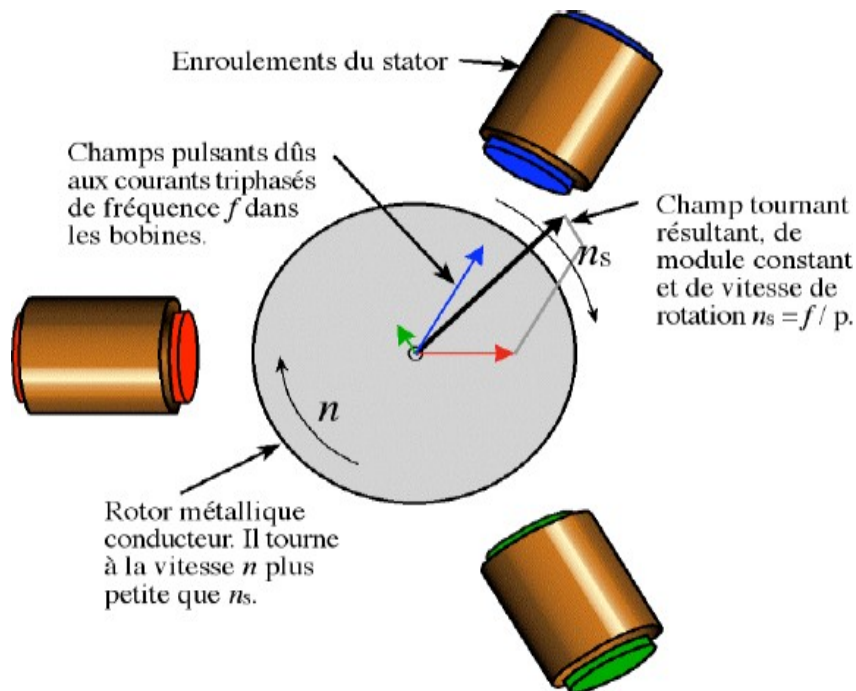


Figure 1.2: Interaction rotor stator.

- ✓ Le rotor tourne à la vitesse de rotation Ω .
- ✓ Des courants induits circulent dans le rotor.
- ✓ L'entrefer est l'espace entre le stator et le rotor.
- ✓ Glissement c 'est l'écart entre vitesse de rotation et vitesse de synchronisme

$$g = \frac{n_c - n}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

n_s : vitesse de rotation de synchronisme du champ tournant (tr/s).

n : vitesse de rotation du rotor (tr/s). [1]

$$\Omega_s = 2\pi n_s \quad \text{Et} \quad \Omega = 2\pi n$$

1.4 Différents types des moteurs asynchrones

Les différents types de moteurs asynchrones se distinguent généralement par le rotor. Dans tous les cas, le stator reste, au moins dans son principe, le même.

1.4.1 Moteur asynchrone à cage

1.4.1.1 Constitution et Principe de fonctionnement

Le circuit du rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui du moteur à rotor bobiné. Les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium, suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur. Dans certaines constructions, notamment pour des moteurs à basse tension (par exemple 230/400 V), la cage est réalisée par coulée et centrifugation d'aluminium. On démontre que, si le nombre de barres est suffisamment grand (soit en pratique, $N_b \geq 8xp$), la cage se transforme automatiquement en un circuit polyphasé de polarité adéquate.

Ce type de moteur, beaucoup plus aisé à construire que le moteur à rotor bobiné est par conséquent d'un prix de revient inférieur et a une robustesse intrinsèquement plus grande. Il n'est donc pas étonnant qu'il constitue la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones actuellement en service. Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes). [2]

1.4.1.2 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone à cage

<i>Avantages</i>	<i>inconvénients</i>
fiable, robuste, économique	couplage du flux avec le couple électromagnétique c'est à dire le découplage naturel de la machine à courant continu n'existe plus.
simple structure	complexité fonctionnelle du fait que l'accès direct aux grandeurs rotoriques est impossible
possède une bonne standardisation	le réglage du courant rotorique n'est possible qu'à travers le courant statorique.

Tableau 1.1. Avantages et inconvénients de la machine asynchrone à cage.

1.4.2 Moteur asynchrone à rotor bobiné

1.4.2.1 Constitution et Principe de fonctionnement

Le rotor comporte un enroulement bobiné à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôle empilés sur l'arbre de la machine. Cet enroulement est obligatoirement polyphasé, même si le moteur est monophasé, et, en pratique, toujours triphasé à couplage en étoile. Les encoches, découpées dans les tôles sont légèrement inclinées par rapport à l'axe de la machine de façon à réduire les variations de réluctance liées à la position angulaire rotor/stator et certaines pertes dues aux harmoniques.

Les extrémités des enroulements rotoriques sont sorties et reliées à des bagues montées sur l'arbre, sur les quelles frottent des balais en carbone. On peut ainsi mettre en série avec le circuit rotorique des éléments de circuit complémentaires (résistances, électronique de puissance...) qui permettent des réglages de la caractéristique couple/vitesse.

Ce type de moteur est utilisé essentiellement dans des applications où les démarrages sont difficiles et/ou nombreux ; en effet les pertes rotor pendant la phase de démarrage [1]

1.4.2.2 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone à rotor bobiné

La machine asynchrone à rotor bobiné à bagues a l'avantage d'avoir son circuit rotorique bobiné ouvert ce qui permet d'insérer un rhéostat à résistances. Grâce à l'insertion de ces résistances, ce moteur offre les possibilités suivantes :

<i>Avantages</i>	<i>inconvénients</i>
Limiter convenablement l'appel de courant au démarrage.	Le collecteur à bagues exclue son emploi dans une atmosphère
Supporter des démarrages de longue durée car la quasi-totalité de l'énergie est perdue dans le rhéostat.	Les risques d'explosion sont présents et rend son entretien un peu délicat.
Adapter le couple moteur au couple résistant de la charge.	

Tableau 1.2. Avantages et inconvénients de la machine asynchrone à rotor bobiné.

1.5 Machine asynchrone à double alimentation

1.5.1 Description

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est très populaire puisqu'elle bénéficie de certains avantages par rapport à tous les autres types à vitesse variable, son utilisation dans la chaîne de conversion électromécanique en tant que aérogénérateur ou moteur a connu une croissance spectaculaire au cours des dernières années. En effet, le convertisseur d'énergie utilisé afin de redresser-onduler les courants alternatifs du rotor a une puissance nominale fractionnaire de celle du générateur, ce qui réduit son coût par rapport aux topologies concurrentes.

Pour être classée comme machine à double alimentation il faut qu'il y ait des sources actives sur le stator et le rotor à la fois. Dans les systèmes modernes, une de ces sources est dérivée électroniquement, et peut être commandée pour fournir l'opération vitesse variable du système, soit comme un moteur ou un générateur. Le convertisseur de puissance est

typiquement relié à l'enroulement du rotor. L'autre source (réseau) a typiquement une fréquence et une tension nominalement fixées, qui est habituellement un raccordement direct au stator (Figure. 1-4) [3]

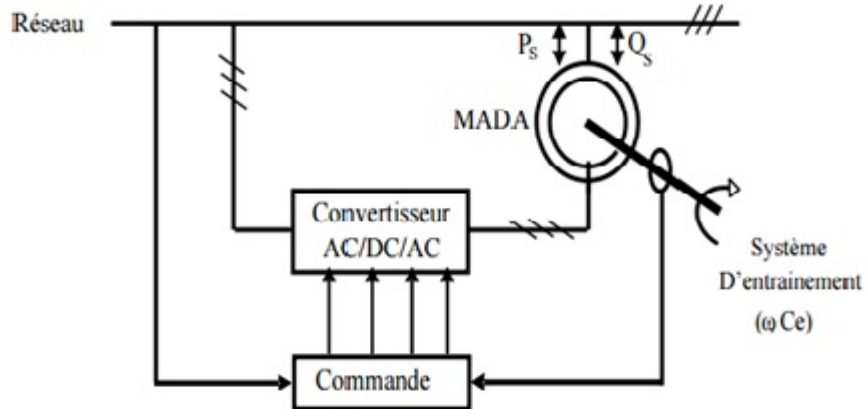


Figure1.3. Schéma d'alimentation typique de la MADA.

1.5.2. Classification

Dans la littérature du domaine des machines asynchrone à double alimentation, on trouvera la classification suivante :

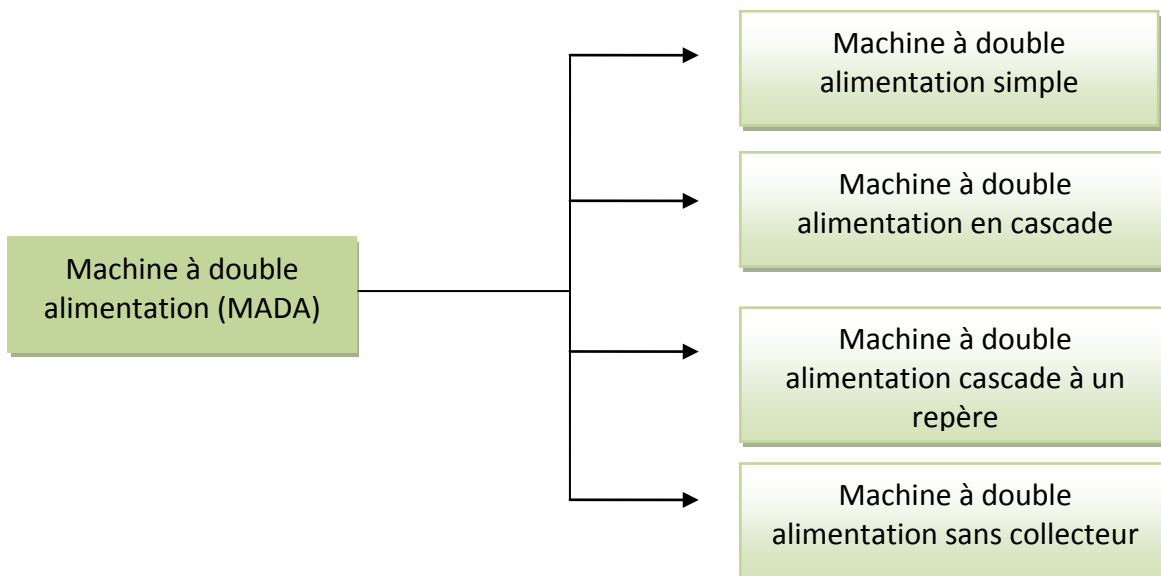


Figure1.4. classification de la MADA.

1.5.2.1 .Machine à double alimentation simple

La machine à double alimentation simple (MADAS), est une machine asynchrone à rotor bobiné occupée par un système balais-bague (Single Doubly Fed Induction Machine). La figure (1.5) illustre le schéma de principe de cette dernière, tel que le stator est alimenté directement par le réseau, ainsi que le rotor est alimenté au moyen d'un convertisseur alternatif de telle sorte que le glissement de la machine peut être contrôlé. Il faut noter que le convertisseur indiqué dans la figure peut être composé par un redresseur et un onduleur (conversion indirecte) ou bien peut être un cycle convertisseur (conversion directe) [3]

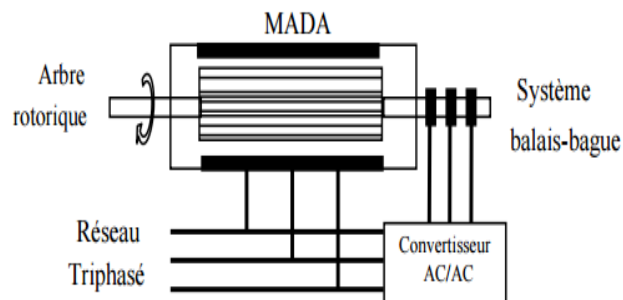


Figure 1.5. Schéma de principe de la machine à double alimentation simple.

1.5.2.2. Machine à double alimentation en cascade

Cette machine est constituée de deux MADA dont les rotors sont couplés électriquement et mécaniquement, (Cascaded Doubly Fed Induction Machine). La figure (1-6) présente le schéma de principe de deux machines asynchrones à rotor bobiné permettant d'obtenir un système à double alimentation.

Les enroulements statoriques sont reliés à deux sources de tensions triphasées .

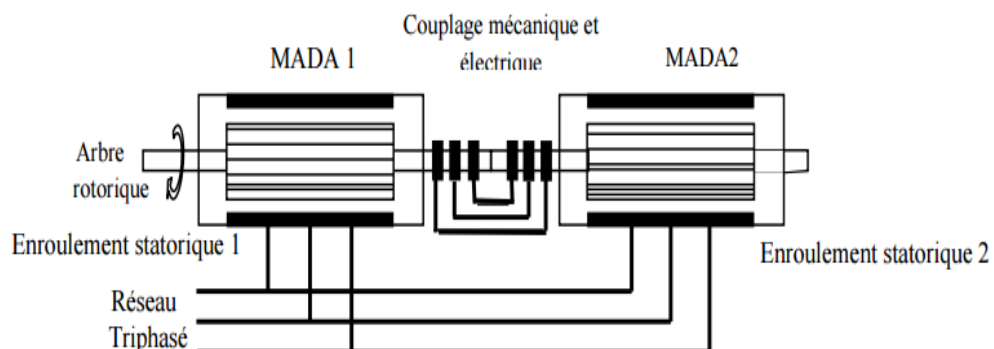


Figure 1.6. Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade

1.5.2.3. Machine à double alimentation cascade à un repère

La machine à double alimentation cascade à un repère consiste de deux machines asynchrones à cage connectés mécaniquement, (Single Frame Cascaded Doubly Fed Induction Machine). La figure (1-7) présente le schéma de principe, tel que le stator de l'une des deux machines est connecté directement au réseau alors que l'autre est connecté à celui-ci par l'intermédiaire d'un convertisseur alternatif-alternatif [3]

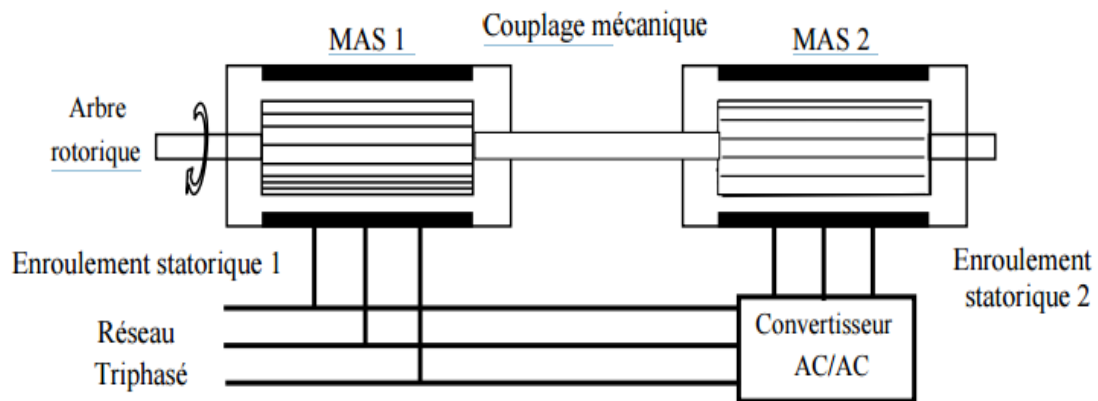


Figure 1.7. Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade à un repère.

1.5.2.4. Machine à double alimentation sans collecteur

Cette machine est constituée par deux enroulements prolongés dans un seul stator. L'un des deux enroulements est alimenté directement par le réseau et l'autre par un convertisseur AC/AC, figure (1-8). Ce type de machine consiste de deux enroulements statoriques ayant des nombres de paires de pôles différents ; ainsi que celui du rotor doit être la somme de ces deux nombres de paires de pôle

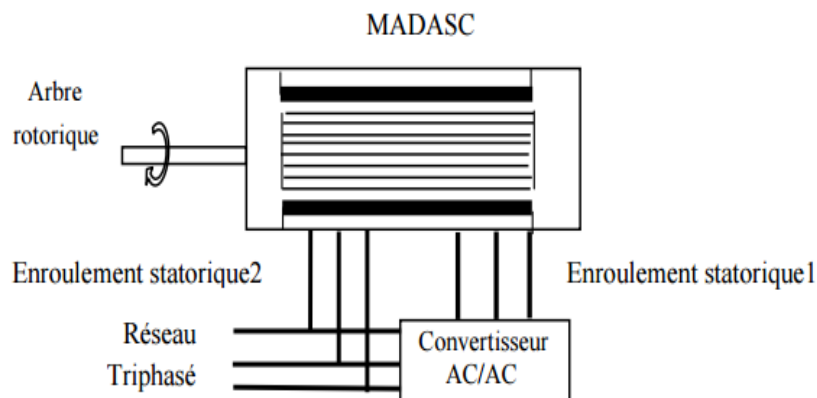


Figure 1.8. Schéma de principe de la machine à double alimentation sans collecteur.

1.6. Etude du fonctionnement en génératrice

L'utilisation de la MADA pour la production de l'énergie électrique à partir de l'énergie éolienne est très répandue. Bien que cette application ne concerne pas le thème considéré La structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA, cette étude s'impose du fait du nombre important des travaux effectués et de la variété des thèmes abordés (modélisation, commande à vitesse variable, sûreté de fonctionnement, etc.) . En effet, avec le regain d'intérêt pour les énergies renouvelables, les systèmes éoliens à vitesse variable avec la MADA connaissent un grand essor et un grand nombre de publications accompagnent ce développement. La littérature est abondante dans ce domaine et les thèmes abordés sont très variés :

- Modélisation des zones limites de fonctionnement et stabilité de la MADA.
- Qualité de l'énergie fournie et qualité des courants et tensions notamment en présence des défauts au niveau du réseau.
- Stratégies de commande de la MADA avec ou sans capteur de vitesse et de position.
- Dimensionnement du convertisseur au rotor.
- Stator relié au réseau ou sur charge indépendante.

La configuration, largement répandue la vitesse variable avec MADA, est représentée par la figure (1-9). Elle consiste à alimenter le rotor par un convertisseur et à lier le stator directement au réseau [4]

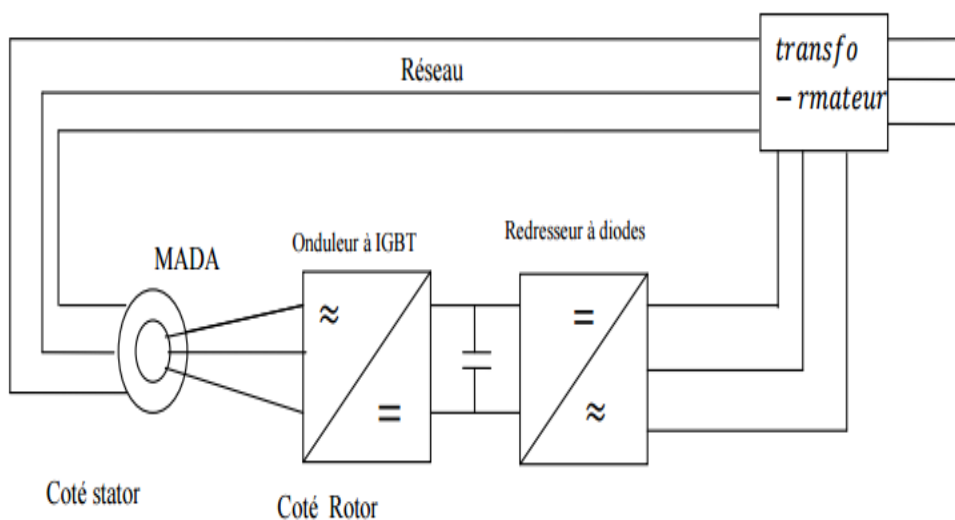


Figure 1.9. Schéma de l'alimentation de la MADA pour application génératrice

1.7. Etude de fonctionnement en moteur

- Pour le cas de l'application moteur de la MADA, les principales études ont été dédiées aux stratégies de commande linéaires et non linéaires avec ou sans capteur de vitesse ou de Position
- L'objet de nos travaux, concerne le fonctionnement moteur où le rotor de la MADA est alimenté par un convertisseur et le stator est alimenté par le réseau figure (1 -10).
- Le nombre d'études traitant ce type de configuration est inférieur au précédent. Néanmoins les travaux présents dans la littérature montrent les bonnes performances de cette machine dans ce mode de fonctionnement. Ces travaux concernent principalement les stratégies de commande

1.7.1. Premières configurations : Stator alimenté par le réseau, rotor alimenté par un onduleur

Cette classe est dite MADA simple. Les enroulements statoriques sont connectés à un réseau triphasé fixe tandis que le rotor est relié à son propre onduleur. La figure (1 -10) représente un schéma de principe de cette catégorie de MADA. [3]

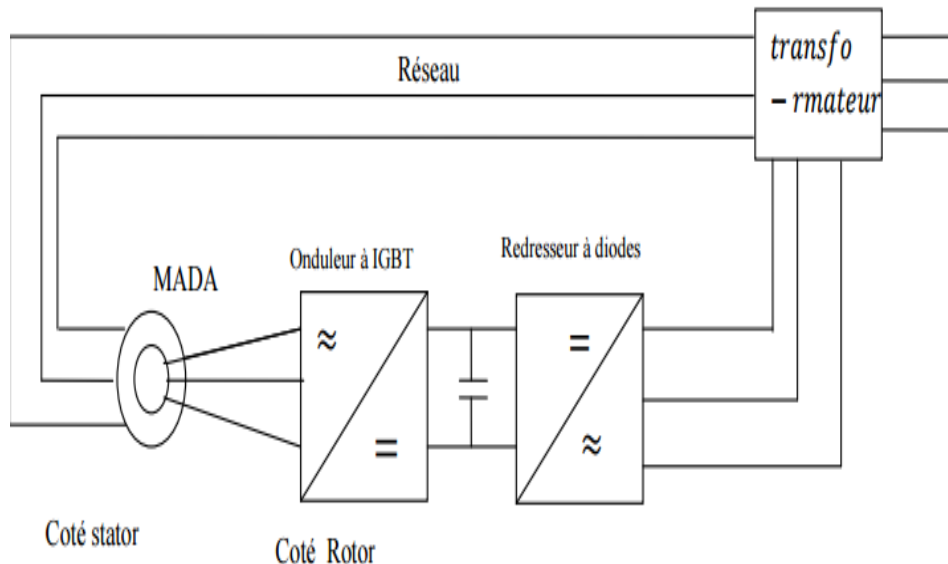


Figure 1.10. Schéma de l'alimentation de la MADA.

1.7.2. Deuxième configuration : Stator relié au réseau, rotor alimenté par un Cycle convertisseur

Dans cette configuration les enroulements statoriques sont connectés à un réseau triphasé fixe tandis que le rotor est relié à un cycle convertisseur. La figure (1 -11) représente un schéma de principe de cette catégorie de MADA.

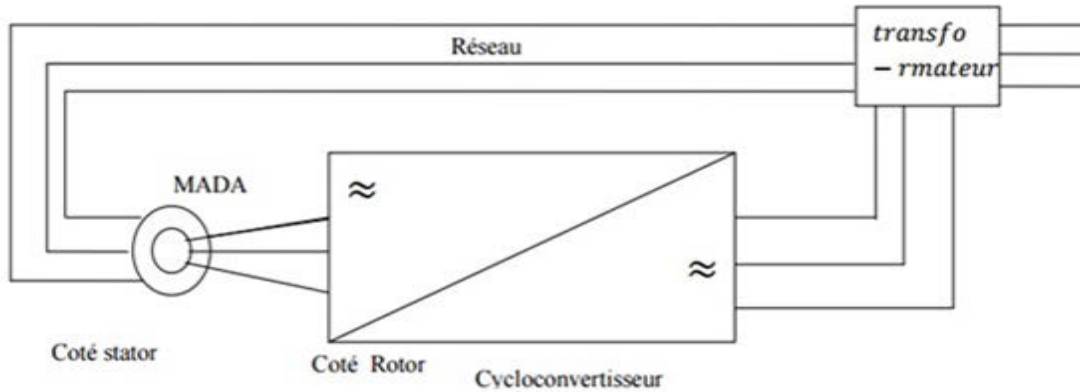


Figure 1.11. Schéma de l'alimentation de la MADA pour application moteur deuxième configuration.

1.7.3. Troisièmes configurations : 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 : [3]

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

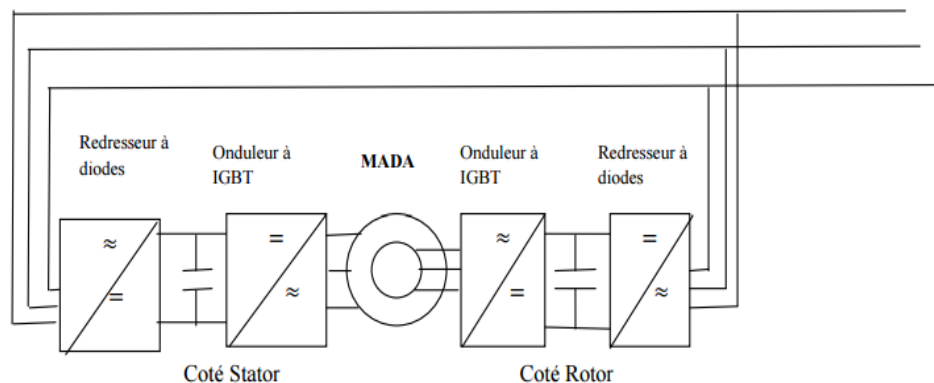


Figure 1.12. Schéma de l'alimentation de la MADA pour application moteur deuxième configuration.

1.8. Régimes de fonctionnement de la MADA

Les différents régimes de fonctionnement de la MADA, peuvent être divisés en fonction de glissement comme suit : [5]

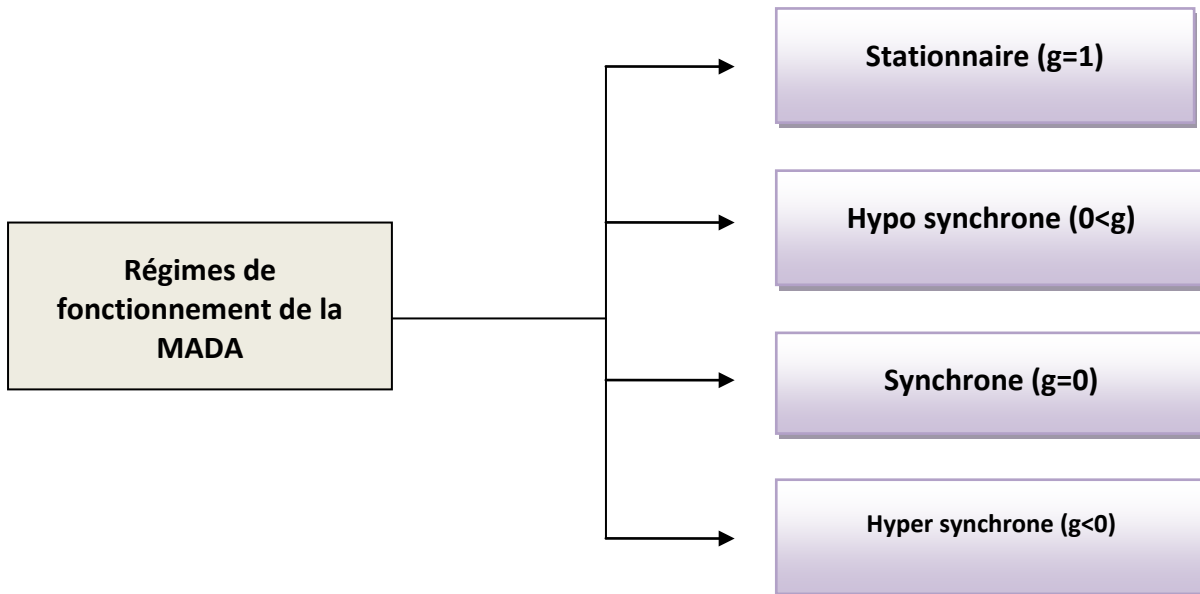


Figure 1.13. Les régimes de fonctionnement de la MADA

1.8.1 Stationnaire ($g=1$)

Le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence f_s ; par conséquent, le rotor est le siège d'une F.E.M induite avec une fréquence f_r identique avec f_s . Dans cette condition, la MADA se comporte simplement comme un transformateur.

1.8.2 Hypo synchrone ($0 < g < 1$)

En tournant le rotor dans la direction du flux du stator, la fréquence f_r du rotor commence à décroître. Plus la vitesse du rotor approche de celle du synchronisme, plus f_r tend vers 0, plus la tension induite dans le rotor décroît linéairement et prend une valeur très faible qui correspond à la vitesse du synchronisme.

1.8.3 Synchrone ($g=0$)

Au point, où la vitesse mécanique du rotor atteint la vitesse de synchronisme, la fréquence f_r du rotor s'annule. Dans ce cas les enroulements du rotor tournent 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 du rotor. On constate que la puissance du stator est égale à celle du réseau, alors que celle du rotor est nulle.

1.8.4 Hyper synchrone ($g < 0$)

Par davantage d'accélération, le flux rotorique rattrape le flux statorique et la fréquence du rotor devient négative. L'augmentation de la vitesse des enroulements du rotor par rapport à celle du flux statorique mène à une augmentation de la tension induite du rotor.

1.9. Transfert de puissance dans la MADA

La présence du convertisseur entre le rotor et le réseau permet de contrôler la puissance entre le stator et le réseau. La figure 1-13 montre les différentes configurations de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire du convertisseur. Prés est la puissance délivrée au réseau ou fournie par le réseau, P_s , la puissance transitant par le stator, P_r , la puissance transitant par le rotor, et P_{mec} , la puissance mécanique. Pour le transfert de puissance, nous distinguons quatre cas possibles [6]

- Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau au stator. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, la puissance P_r «Puissance de glissement» est renvoyée sur le réseau, c'est le fonctionnement moteur hyposynchrone. Les conditions mathématiques qui traduisent ce fonctionnement en négligeant tout les pertes sont :

$$g > 0, P_s > 0, P_{mec} > 0, P_r = g \cdot P_s > 0. \quad (\text{Eq 1.6})$$

La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce fonctionnement, cependant la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

- En mode moteur hypersynchrone, une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique. La puissance est donc fournie à la machine par le stator et le rotor, les conditions mathématiques sont les suivants :

$$g < 0, P_{mec} > 0, P_R = g \cdot P_s < 0. \quad (\text{Eq 1.7})$$

La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement.

➤ En fonctionnement générateur hyposynchrone, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique. La puissance est fournie au réseau par le stator et une partie de cette puissance transitant par ce dernier est réabsorbée par le rotor. Les conditions mathématiques sont les suivants :

$$g > 0, P_s < 0, P_m < 0, P_R = g \cdot P_s < 0. \quad (\text{Eq 1.8})$$

La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement.

➤ En mode hypersynchrone, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près par le rotor et le stator. Les conditions mathématiques sont les suivants :

$$g < 0, P_s < 0, P_m < 0, P_R = g \cdot P_s > 0. \quad (\text{Eq 1.9})$$

La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce fonctionnement mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

On peut donc remarquer que la MADA a deux principaux avantages sur la machine à cage classique : la production de puissance électrique quelque soit la vitesse de rotation (hypo ou hypersynchronisme) et la récupération de la puissance de glissement.

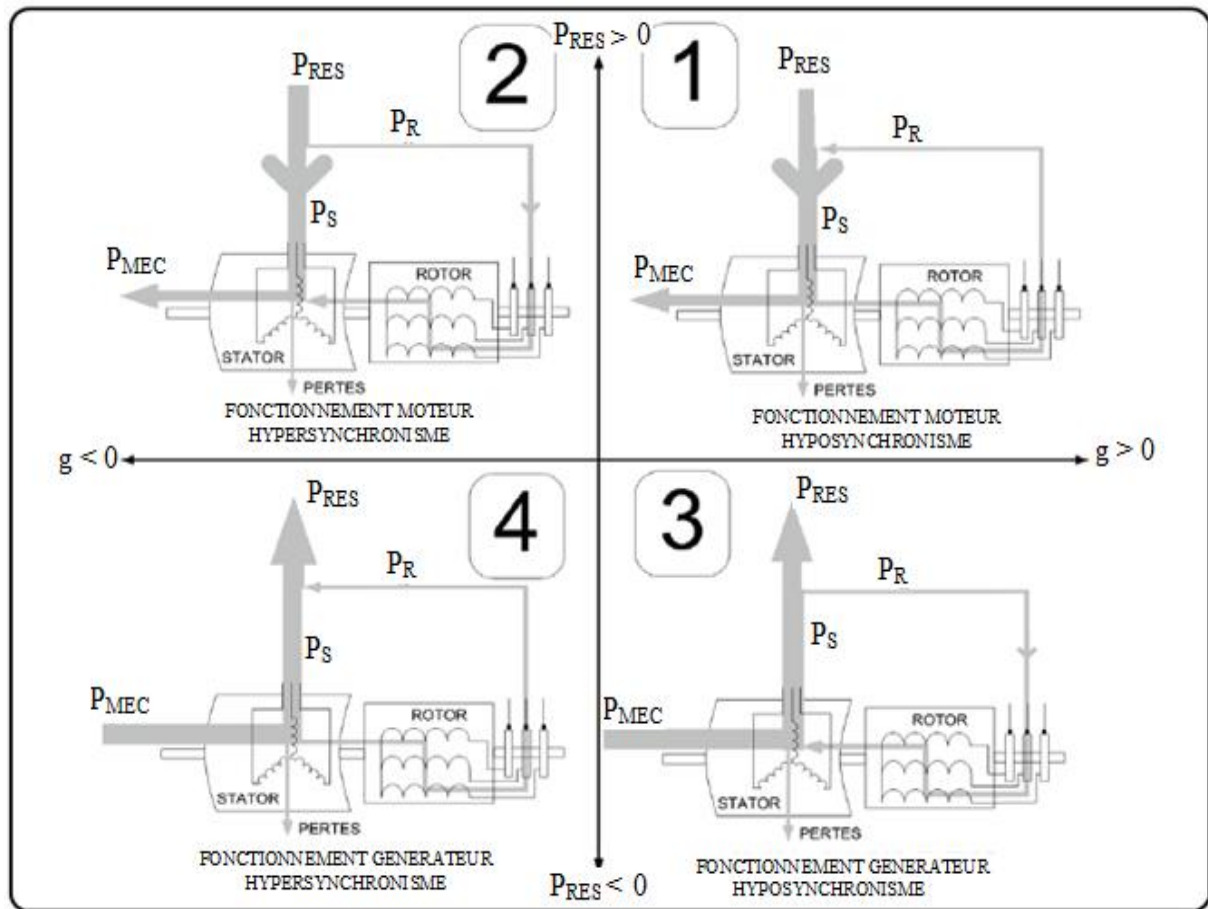


Figure 1.14. Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation

1.10 Défauts des machines triphasée

Nous rappelons brièvement les différents défauts des machines triphasée ainsi que leurs origines sans pour autant prétendre à l'exhaustivité. Ces défauts apparaissent dans les différentes parties constituant la machine. [7]

1.10.1. 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 (1-14) et (1-15). 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 statoriques, entrefer mécanique...) alors que les défauts *externes* sont provoqués, soit par les tensions d'alimentation et la charge mécanique.

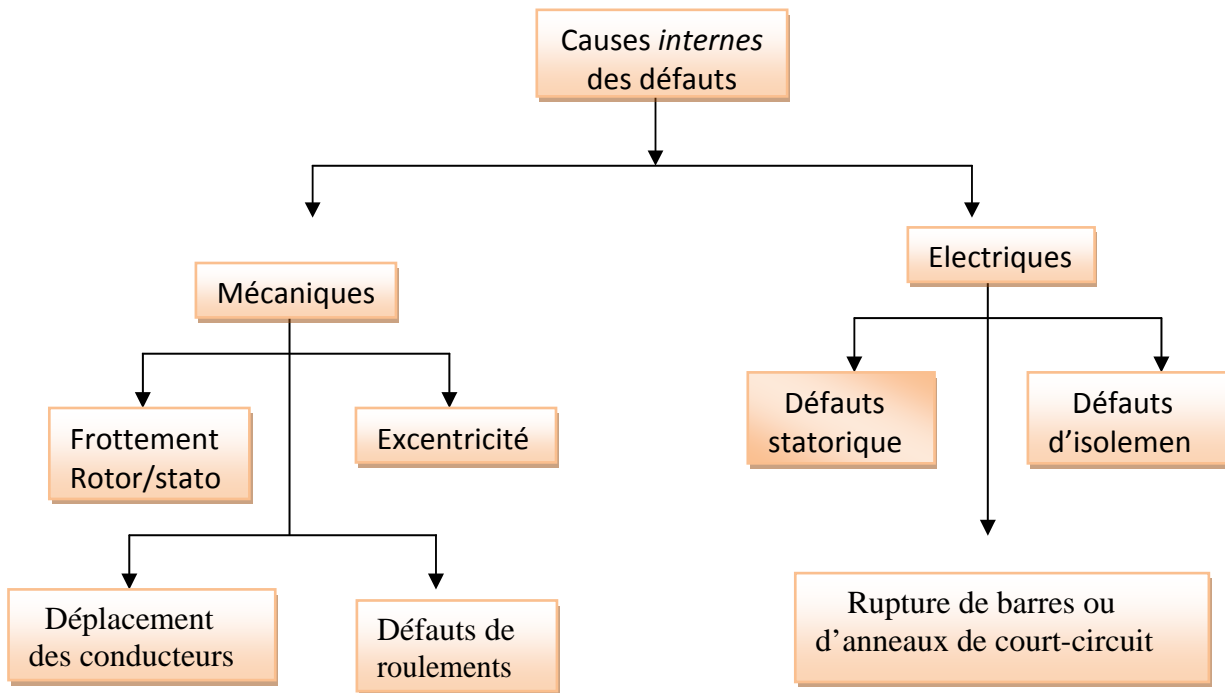


Figure 1.15. Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage

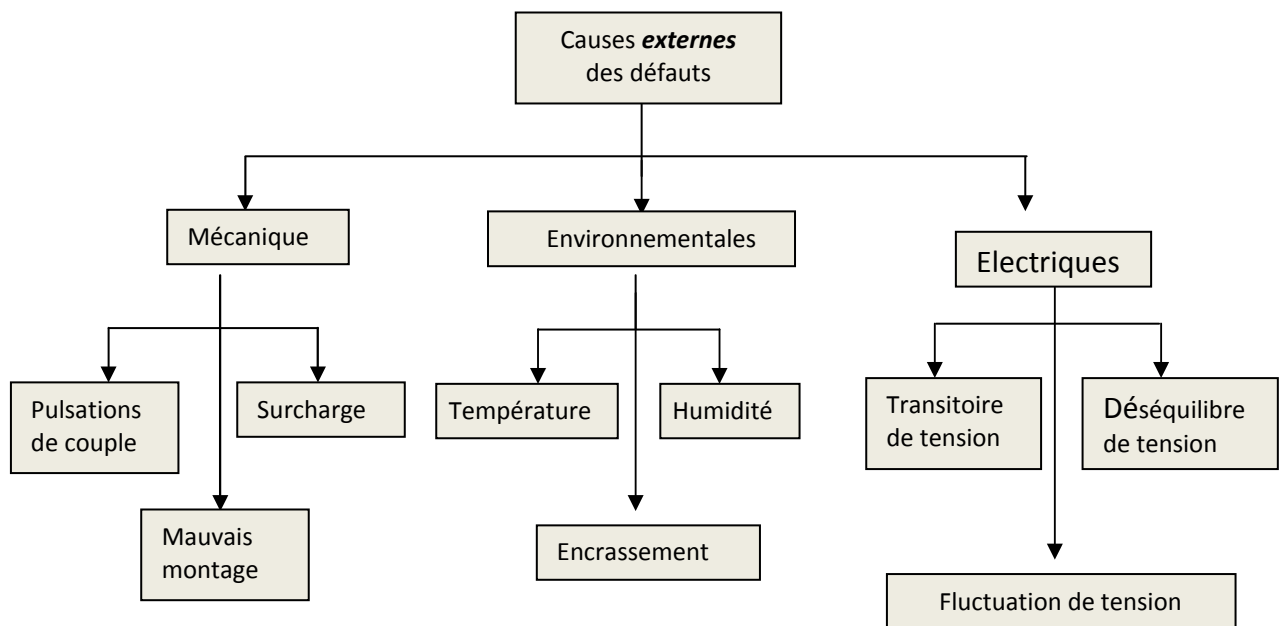


Figure 1.16. Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.

Au niveau de l'**entrefer**, les défauts se manifestent par une *excentricité* statique, une excentricité dynamique ou une excentricité mixte. Le défaut d'excentricité statique est généralement dû à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. Le défaut d'excentricité dynamique peut être causé aussi bien par une déformation

du cylindre rotorique que par une déformation du cylindre statorique. L'excentricité mixte est une combinaison des deux.[7]

Les transitoires de tension lié aux perturbations du réseau électrique, les transitoires sont des signaux parasites pouvant atteindre 400 volts (mais généralement plus faible) à des fréquences élevées qui se superposent sur la tension de réseau 50 Hz

1.11. Principaux défauts liés à la MAS

1.11.1. Le déséquilibre de tension et de courant

Dans un réseau triphasé, on a idéalement des amplitudes égales de la tension et du courant respectivement sur chacune des trois phases et un angle de phase de 120 degrés. Lorsque les tensions ou les courants présentent une différence d'amplitude, il y a déséquilibre et cela peut causer des problèmes pour les équipements triphasés branchés au réseau. L'impact le plus courant du déséquilibre est la surchauffe des équipements et, par conséquent, la dégradation de l'isolation électrique et la réduction de la durée de vie.

Les déséquilibres de tension surviennent habituellement en présence d'un déséquilibre des charges et de leurs appels de courant. En effet, toute charge triphasée doit appeler un courant identique sur chaque phase. Quant aux charges monophasées branchées à un réseau triphasé, on doit les répartir le plus uniformément possible entre les trois phases. De plus, certains déséquilibres de tension résultent de l'exploitation et de la nature des équipements du réseau électrique. [8]

1.11.2. Ruptures des barres rotorique

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor, elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau de court-circuit, la détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées.

1.11.3. Court-circuit au niveau du stator

Pour les défauts court-circuit on peut citer deux types connus [8] :

1.11.3.1. Court-circuit entre spires

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Il a pour origine des défauts liés à l'isolant dans l'enroulement concerné (séparant les spires et la carcasse) ou bien à cause d'une surchauffe de la machine qui endommagera ces mêmes isolants. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, qui modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotoriques de la MAS.

1.11.3.2. Court-circuit entre phases

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système. L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs 11 d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court circuit proche du neutre entre deux phases a de moins graves conséquences ; il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de la fusion des conducteurs.

1.12. Transformée de Fourier rapide (FFT)

Pour identifier le type de défaut on utilise la méthode d'analyse spectrale des courant statorique (F F T).

L'analyse de Fourier est une base majeure de la physique et des mathématiques. Elle est indissociable du traitement du signal, et ce pour deux raisons principales. La première est l'universalité du concept de fréquence sur lequel elle repose. La seconde tient à la structure même de l'analyse de Fourier qui se prête aisément à des transformations communes comme le filtrage linéaire en les traduisant de manière particulièrement simple. Le principe de la transformée de Fourier repose sur le fait que toute fonction périodique peut être représentée comme la somme d'une série de sinus et de cosinus dont on fait varier d'une part les amplitudes en les multipliant par des coefficients, et d'autre. [9]

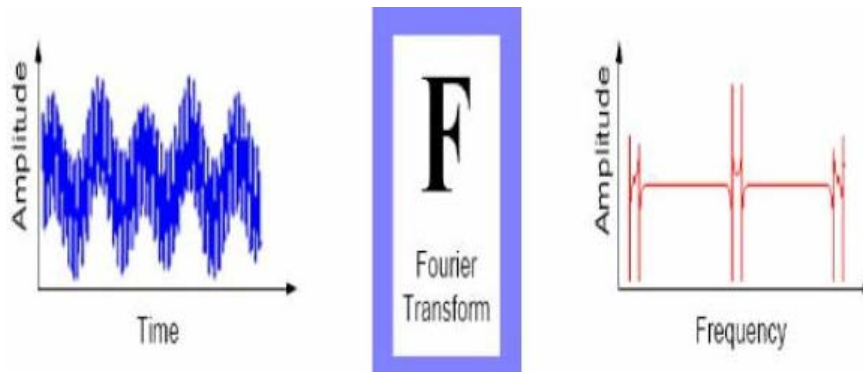


Figure 1.17. Principe de la Transformée de Fourier.

1.13. Effets des défauts électriques sur les courants statoriques

Dans les spectres du courant, il y a la présence d'harmoniques conditionnés par la qualité de la tension d'alimentation et les harmoniques qui peuvent provenir suite au défaut de fabrication de la machine elle-même. Quoique l'on utilise les nouveaux Matériaux actifs et les nouvelles technologies de fabrication on ne peut concevoir la machine idéale. Seulement, dans ce travail de diagnostic le spectre est considéré comme référentiel et toute émergence de nouvel harmonique ou de modifications dans les amplitudes de celles déjà existantes nécessite une interprétation. Ainsi, les anomalies du moteur et des mécanismes qui lui sont accouplés font apparaître aussi des harmoniques correspondants dans le spectre du courant. Les plus grandes dynamiques présentes dans le spectre du courant se produisent à la fréquence d'alimentation électrique et ses harmoniques.

1.13.1. Le déséquilibre de tension et de courant

Les défauts de déséquilibre électrique et de mauvais branchement en générale sont détectés par la lecture des fréquences des harmoniques appropriés de la phase du courant statorique. [10]

$$f_{dés} = k \cdot f_s \quad (\text{Eq 1.10})$$

Avec :

$k \in \mathbb{R}^{*+}$ et impaire.

f_s : fréquence d'alimentation statorique.

1.13.2. Ruptures des barres

Les harmoniques de flux sont produites et induisent des harmoniques de courant dans l'enroulement statorique aux fréquences autour de la fréquence fondamentale f_s telle que

$$F_{rb} = f_s (1 \pm 2.k.g) \quad (\text{Eq 1.11})$$

Avec :

$k \in \mathbb{R}^{*+}$ et impaire.

g : glissement.

1.13.3 Court-circuit au niveau du stator

Les courts circuits qui apparaissent entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou entre deux phases statorique. Les courts circuits entre spires est donc le défaut le plus fréquemment rencontré au stator, la fréquence caractéristique de ce défaut est :

$$f_{cc} = f_s \left[\frac{n}{p} (1-g) \pm k \right] \quad (\text{Eq 1.12})$$

Avec :

$k \in \mathbb{R}^{*+}$ et impaire

$n \in \mathbb{R}^{*+}$

P : nombre paire de pole

1.14. Etudes statistique des défaillances de la machine asynchrone

L'étude conduite pour établir une statistique des différents défauts pouvant se produire sur une machine électrique. [7]

La figure 1.17 présente les phénomènes par deux types de défaut majeur, le défaut statorique et le défaut rotorique.

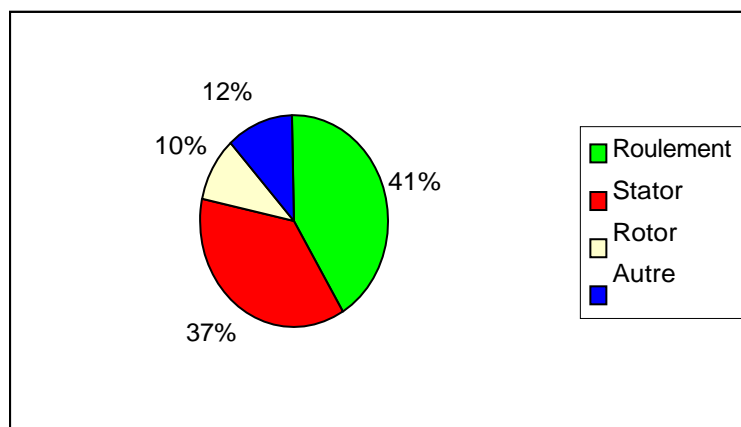


Figure 1.18. Répartition des défauts.

La figure 1.18 présente les phénomènes à l'origine des défauts dans la machine : la principale source de défauts provient de la mécanique; la deuxième cause de défauts est la surchauffe du moteur; la troisième cause de défauts référencés est le claquage d'isolants conduisant à des courts-circuits.

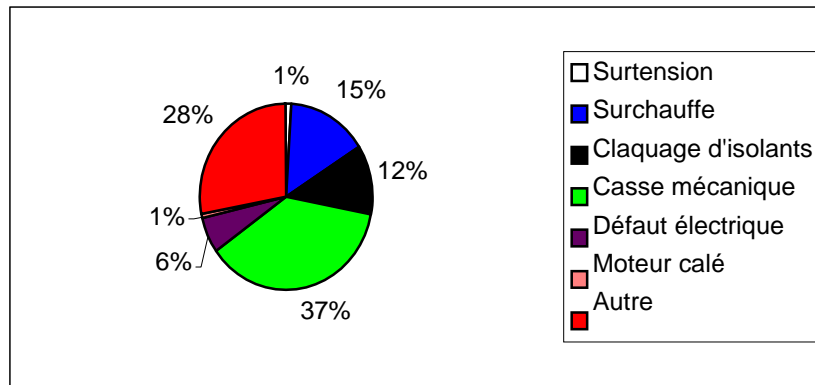


Figure 1.19. Répartition des causes des défauts pour une machine asynchrone.

La figure 1.19 précise les conditions qui aggravent le défaut: la première source d'aggravation provient de l'usure des éléments avec l'âge et la durée de service. Cette usure est renforcée par les différentes conditions de fonctionnement (surchauffe, humidité, exposition,...). En règle générale, toute différence par rapport au point de fonctionnement nominal contribue à aggraver le défaut naissant voir à le faciliter.

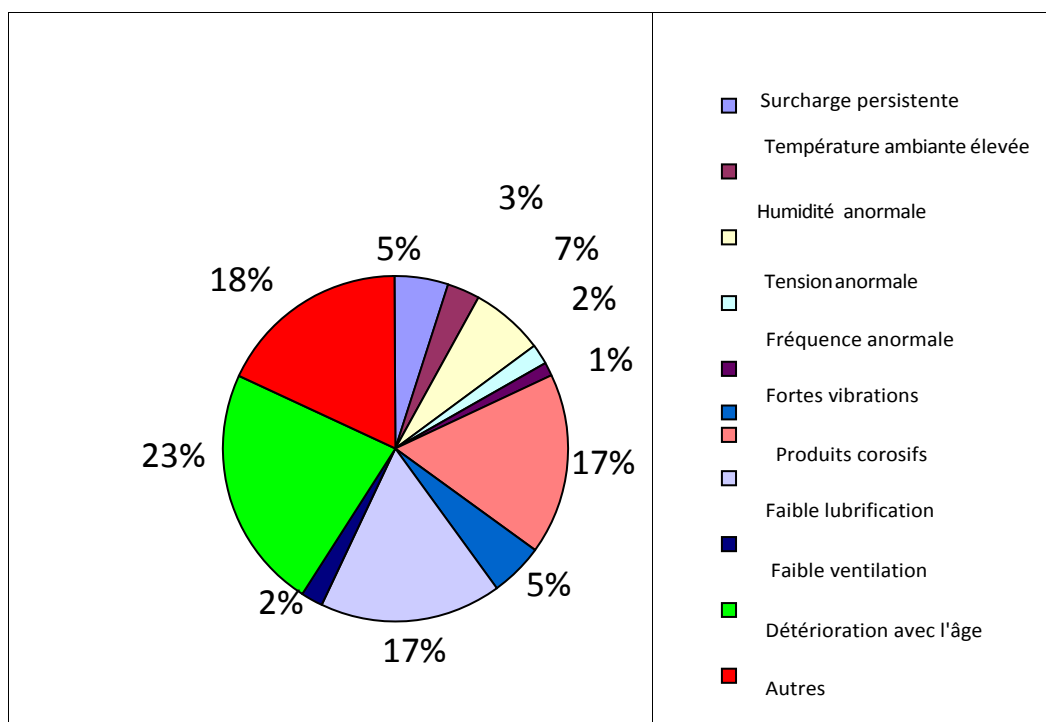


Figure 1.20. Facteurs aggravant le défaut.

A signaler que ces statistiques ne sont pas détaillées par type de branches industrielles; par conséquent, elles peuvent avoir des significations différentes selon qu'on parle d'industries d'hydrocarbures ou cimentières ou autres.

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.

La machine asynchrone qui fait actuellement l'objet d'un intérêt accru dans plusieurs applications, ceci étant dû essentiellement à sa fiabilité, son coût relativement faible, sa robustesse et sa simplicité de construction. Ceci donne à la machine son caractère de processus multi-variables et non linéaire.

2.1. Introduction

La modélisation et la simulation de la machine asynchrone double alimentation a fait l'objet de nombreux travaux, que ce soit dans le but de conception, de la commande ou le diagnostic.

La diversité des objectifs a fait paraître plusieurs techniques de la modélisation et des outils de la simulation selon le domaine étudié. Mais ces outils sont souvent trop spécifiques à une topologie ou à une machine bien déterminée. Il serait, cependant, intéressant de disposer d'un outil simple et générique, pouvant servir comme un banc d'essai pour les machines électriques.

2.2 Conception assisté par ordinateur CAO

2.2.1 Définition de CAO

Le terme de «Conception assistée par ordinateur» ou bien la CAO est aujourd'hui utilisée à tort et à travers, ce qui lui vaut de perdre de sa signification. Pour des personnes, cette appellation couvre l'ensemble des tâches qu'un ordinateur est capable d'assumer lors du développement de produits techniques, les spécialistes utilisent plutôt le vocabulaire de «X» assistée par ordinateur (XAO), où «X» peut être remplacé par «dessin», «fabrication», «conception». D'autre part, il est naïf de croire que l'emploi des moyens de CAO n'est justifié que lors du calcul des circuits électroniques intégrés, avant de disserter sur les différentes possibilités de CAO dans le domaine des machines électriques. [11]

2.2.2 Historique de CAO

La technologie CAO a pris naissance au sein des grands programmes militaires américains dans les années 1950. Ensuite, elle a pénétré le domaine de l'aéronautique civile, l'automobile, l'industrie informatique, l'architecture, le génie civil. Nous pouvons distinguer plusieurs générations de systèmes de CAO, qui peuvent être classifiées, d'un point de vue historique, de la manière suivante:[11]

- ✓ le Dessin Assisté par Ordinateur (DAO): les objets sont représentés par la projection de— leurs arêtes sur un plan bidimensionnel 2D.

- ✓ la représentation dite fil de fer (Wireframe): les objets sont représentés par ses arêtes mais– dans l'espace tridimensionnel 3D.
- ✓ la représentation des objets par leurs frontières surfaciques B-REP (Boundary–Representaion).
- ✓ la représentation par l'espace tridimensionnel occupé par l'objet, cette génération est– appelée la technique de «Constructive Solid Geometry» (CSG) ou l'arborescence de construction.

2.3. Les équations de Maxwell

2.3.1 Introduction

Les équations de MAXWELL sont la formulation mathématique complète qui régit tous les phénomènes électromagnétiques de tous dispositifs. Ces équations sont généralement interdépendantes de faite que les phénomènes magnétiques et électriques sont couplés.

2.3.2 Les équations

2.3.2.1 Equation de Maxwell-Faraday

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 [13]

$$\overrightarrow{rot}\vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Eq2.1})$$

2.3.2.2 Equation de Maxwell-Ampère

Les champs magnétiques peuvent être générés de deux manières: par la variation d'un champ électrique ou par les courants électriques. [13]

$$\overrightarrow{rot}\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{Eq2.2})$$

2.3.2.3 Equation de conservation de flux magnétique

$$\overrightarrow{div}\vec{B} = 0 \quad (\text{Eq2.3})$$

2.3.2.4 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 [12]

$$\overrightarrow{\text{div}} \vec{D} = \rho \quad (\text{Eq2.4})$$

Avec :

$\vec{E}(\text{V.m}^{-1})$	Champ électrique,
$\vec{B}(\text{T})$	Induction magnétique,
$\vec{H}(\text{A.m}^{-1})$	Champ magnétique,
$\vec{J}(\text{A.m}^{-2})$	Densité de courant,
$\vec{D}(\text{C.m}^{-2})$	Induction électrique,
$\rho(\text{C.m}^{-3})$	Charge volumique,
$\frac{\sigma D}{\sigma t}(\text{A.m}^{-2})$	Densité de courant de déplacement.

Remarques

- Ces équations s'appliquent quel que soit le milieu.
- Ce sont des équations locales: elles établissent des relations entre des valeurs locales (ponctuelles) des grandeurs et de leurs dérivées.
- Les distributions de ρ et J sont des distributions réelles et sont supposées connues.
- Les grandeurs E et D , H et B , J et E ne sont pas (respectivement) indépendantes entre elles car elles sont liées par les lois de comportement des milieux, appelées aussi relations constitutives.

2.3.3 Les problématiques

2.3.3.1 Problème statique

Le problème est statique, cela signifie que les grandeurs sont indépendantes du temps si bien que les équations de Maxwell qui sont au nombre de quatre décrivant les champs électriques et magnétiques sont découplées deux à deux. Dans notre cas nous allons nous intéresser aux deux équations concernant la magnétisation : [13]

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{H}=\vec{j} \quad (\text{Eq2.5})$$

$$\overrightarrow{\text{div}}\vec{B}=0 \quad (\text{Eq2.6})$$

Ou :

$H(A/m)$: Représente le champ magnétique

$B(\text{Tesla})$: Représente l'induction magnétique

$J(A/m^2)$: Représente la densité locale du courant électrique

La relation qui relie le champ et l'induction magnétique dépend de la propriété magnétique du milieu représenté par la perméabilité magnétique $\mu(H/m)$

L'induction magnétique est dérivée d'un potentiel vecteur magnétique $A(T\cdot m)$ sous la forme suivant :

$$\vec{B}=\overrightarrow{\text{rot}}\vec{A} \quad (\text{Eq2.7})$$

L'induction de ce potentiel permet de combiner les deux équations de la magnétostatique en une seule équation de la forme

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{1}{\mu}\overrightarrow{\text{rot}}\vec{A}\right)=\vec{j} \quad (\text{Eq 2.8})$$

La majeure partie des machines électriques sont symétrique cylindrique, même que le champ est contenu dans plan (x, y) et les courant sont dans la direction orthogonale (z) à ce plan.

Alors les problèmes sont en deux démentions et le vecteur est dans la direction axiale. On trouve alors pour un milieu homogène :

$$\left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu J_z\right) \quad (\text{Eq2.9})$$

Lorsque :

$$\overrightarrow{\text{div}}\vec{A}=0 \quad (\text{Eq 2.10})$$

Une connaissance de la représentation du potentiel vecteur permet de déterminer l'induction de champ magnétique.

2.3.3.2 Problème dynamique

Pour des cas où on trouve que les grandeurs magnétiques sont lentement variables en fonction de temps, le couplage électromagnétique existe au sens des états quasi-stationnaires ; il est modélisé par l'équation suivante de Maxwell : [13]

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (\text{Eq2.11})$$

Ou :

$E(\text{V/m})$: Représente le champ électrique.

Dans ces conditions, le potentiel vecteur vérifie l'équation suivante :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{\text{rot}} A \right) = \sigma [\partial_t A + \overrightarrow{\text{grad}} V] \quad (\text{Eq2.12})$$

Ou :

$\sigma (\Omega^{-1} \text{m}^{-1})$: Représente la conductivité électrique reliant la densité de courant au champ électrique

V : Représente le potentiel électrique imposé par une source extérieure.

Pour les cas de variation des grandeurs sinusoïdales dans le temps à la pulsation ω on introduit alors la représentation complexe de toutes les grandeurs électromagnétiques.

Comme exemple, le potentiel vecteur peut s'écrire sous la forme :

$$a(t) = \sqrt{2} A \cos(\omega t + \alpha) = \sqrt{2} \text{Re} [A e^{-i\omega t}] \quad (\text{Eq2.13})$$

Ou :

$a(t)$: Représente la valeur instantanée du potentiel vecteur et A représentation complexe.

En ce qui concerne un milieu homogène non soumis à une source extérieure, ce qui est généralement le cas pour des machines synchrones.

$$\nabla^2 A = J \omega \sigma \mu_s \quad (\text{Eq2.14})$$

Cette équation représente l'équation de diffusion du champ électromagnétique en milieu homogène en régime sinusoïdal établi. C'est la modélisation en régime harmonique.

Pour le type de machine étudiée et selon le phénomène modélisé, on utilisera une formulation statique ou harmonique dans notre modélisation. Quand il s'agira d'identifier

Les paramètres d'un modèle circuit tel que les inductances propre ou mutuelles, nous allons utiliser une formulation statique.

En ce qui concerne les régimes transitoire ou déséquilibres, l'utilisation d'une modélisation dynamique avec une résolution en pas à pas dans le temps est inévitable.

2.4 Les méthodes numériques

Les méthodes numériques permettent de résoudre les équations décrivant le comportement électromagnétique des systèmes à deux ou à trois dimensions avec un minimum d'hypothèses. Parmi ces méthodes de résolution numériques les plus utilisées sont la méthode des différences finies et la méthode des éléments finis. Chacune de ces deux méthodes présente des avantages et des inconvénients et est plus ou moins adaptée suivant le type de problème posé.

2.4.1 Méthode des différences finies

La méthode des différences finies dans le domaine temporel est une méthode numérique basée sur la discrétisation en temps et en espace des équations de Maxwell. Elle est très utilisée pour traiter des problèmes de rayonnement électromagnétique

(Compatibilité électromagnétique, détection de mines, antennes), pour l'analyse de l'interaction des ondes avec des tissus humains, pour le développement de composants micro-ondes, et aussi en optique.[14]

Avantages	Inconvénients
formulation relativement simple	limitée en termes de précision
les calculs s'effectuant directement dans le domaine temporel	le maillage repose sur des éléments carrés ou carrés curvilignes.
, la robustesse de l'algorithme qu'elle utilise et dans la possibilité d'effectuer des études sur une large bande de fréquence	

Tableau 2.1. Avantages et inconvénients de la méthode des différences finies.

2.4.2 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (FEM) dite méthode "universelle" est un outil le plus utilisée et la plus puissante des méthodes numériques. Elle est basée sur la résolution numérique des équations de Maxwell[15]

La modélisation des machines électriques a connu un développement remarquable ces dernières décennies grâce l'utilisation de la méthode des éléments finis. En effet, beaucoup de laboratoires et chercheurs se sont penchés sur différents aspects pour aboutir actuellement à des outils de calculs permettant de tenir compte de plusieurs phénomènes physiques jusque là négligés ou approchés par des modèles externes.

Elle permet de décrire fidèlement des géométries complexes et de tenir compte des non linéarités des propriétés physiques telles que la loi $i = b(h)$ dans les matériaux magnétiques.

La méthode d'éléments finis est capable d'examiner l'effet de saturation et les effets d'harmoniques de l'espace et donne beaucoup d'informations précises sur le comportement des machines électriques mais elle requiert un temps de calcul important. Aujourd'hui, on peut effectuer les analyses en régimes transitoires pas à pas dans le temps de la machine électrique grâce à la disponibilité des ordinateurs puissants.

Cette méthode a permis un apport significatif en termes d'identification des paramètres des modèles circuit alliant ainsi la rapidité des modèles circuits et la précision des modèles champ.

L'utilisation de cette méthode pour la modélisation des défauts dans les machines électriques est une étape importante qu'ont franchie un certain nombre de chercheurs. Lorsqu'un défaut se produit dans la machine électrique, la répartition des courants dans les encoches et la distribution du champ sont plus ou moins modifiées en fonction de la gravité du défaut.

La méthode d'éléments finis peut être utilisée pour le calcul de champs et l'identification précise des paramètres de la machine en présence de défaut.

L'avantage qu'apporte une méthode basée sur le calcul de champ réside dans le fait qu'elle décrit les phénomènes localement, en particulier un défaut, elle en donne ensuite une représentation globale vu du circuit électrique équivalent. Actuellement, On peut disposer d'un outil complet permettant la simulation d'une machine électrique en présence d'un défaut de court-circuit et connectée à son alimentation. [16]

2.4.2.1 Implémentation de la méthode des éléments finis

La mise en œuvre de la méthode des éléments finis débouche inévitablement sur un logiciel qui lui est associé. Si, lors des premières tentatives de calcul par la méthode des éléments finis, on écrivait, pour chaque nouveau problème, un programme différent tenant compte de sa géométrie particulière, de ses particularités physiques et de ses conditions aux limites, on s'oriente aujourd'hui vers la réalisation de logiciels généraux dont la structure informatique est adaptée au traitement d'un grand nombre de problèmes d'un même type.

Ces logiciels ont pratiquement tous la structure représentée sur la figure 2.4 qui consiste en un programme séparé en quatre grands blocs : le pré processeur, le maillage, le solveur et le post processeur.

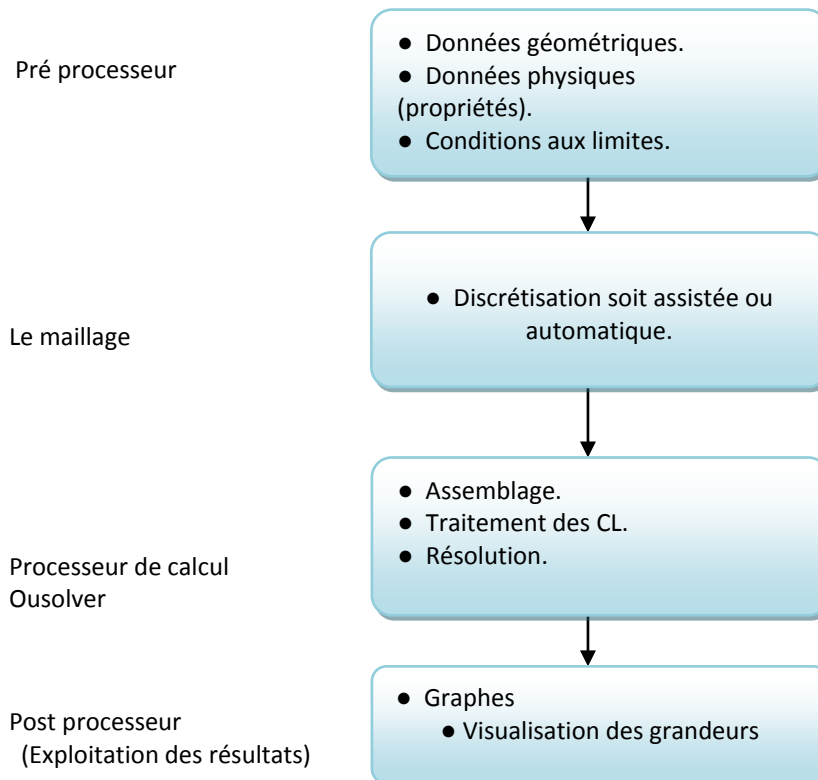


Figure 2.1. Organisation du logiciel

2.4.2.2 Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis

Avantages	Inconvénients
Adaptation aux géométries complexes.	Mise en œuvre relativement difficile.
Prise en compte des non linéarités.	Inapplicable sur les domaines infinis.
Temps de calcul relativement avantageux.	Présence des singularités dans le domaine d'étude.

Tableau 2.2. Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis.

2.5 Logiciel FLUX-2D

2.5.1 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.

2.5.2 Définition

C'est un logiciel de modélisation par éléments finis prenant en compte les phénomènes magnétiques et thermiques et permettant des régimes évolutifs. C'est donc un logiciel parfaitement adapté à nos besoins. Nous ne détaillerons pas son fonctionnement car des tutoriaux sont très bien conçus et ce n'est pas le propos [17].

Le logiciel permet de calculer et de visualiser les grandeurs utiles à l'ingénieur, pour des dispositifs bidimensionnels ou à symétrie de révolution comportant des matériaux à caractéristiques linéaires ou non, isotropes ou non.

C'est un logiciel complet ayant l'avantage de permettre le couplage avec les équations de circuits ainsi que l'ajout d'une région surfacique particulière dite « bande de roulement » pour l'étude des machines tournantes avec différentes positions du rotor, sans avoir à modifier la géométrie et le maillage.

2.5.3 La résolution d'un problème

La résolution d'un problème fait appel à des modules spécialisés [1]:

2.5.3.1 Module préprocesseur

Permet, à travers plusieurs modules, de définir la géométrie du dispositif à étudier (PREFLU), de choisir et/ou de construire une banque de matériaux (CLSMAT), d'affecter les propriétés physiques aux différentes régions géométriques prédéfinies (PROPHY) et de définir le schéma et/ou les données du circuit électrique (CIRFLU). Il permet également un maillage automatique d'une géométrie 2D prédéfinie (PREFLU).

2.5.3.2 Module processeur

Constitué principalement d'un module de résolution 2D (SOLVER_2D) des différents modèles usuels de l'électromagnétisme et des problèmes thermiques.

2.5.3.3 Module post-processeur de Flux-2D (PostPro_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. De façon générale, l'enchaînement des programmes de Flux-2D, doté d'une interface de Windows est schématisé par la figure (2.5). [1]

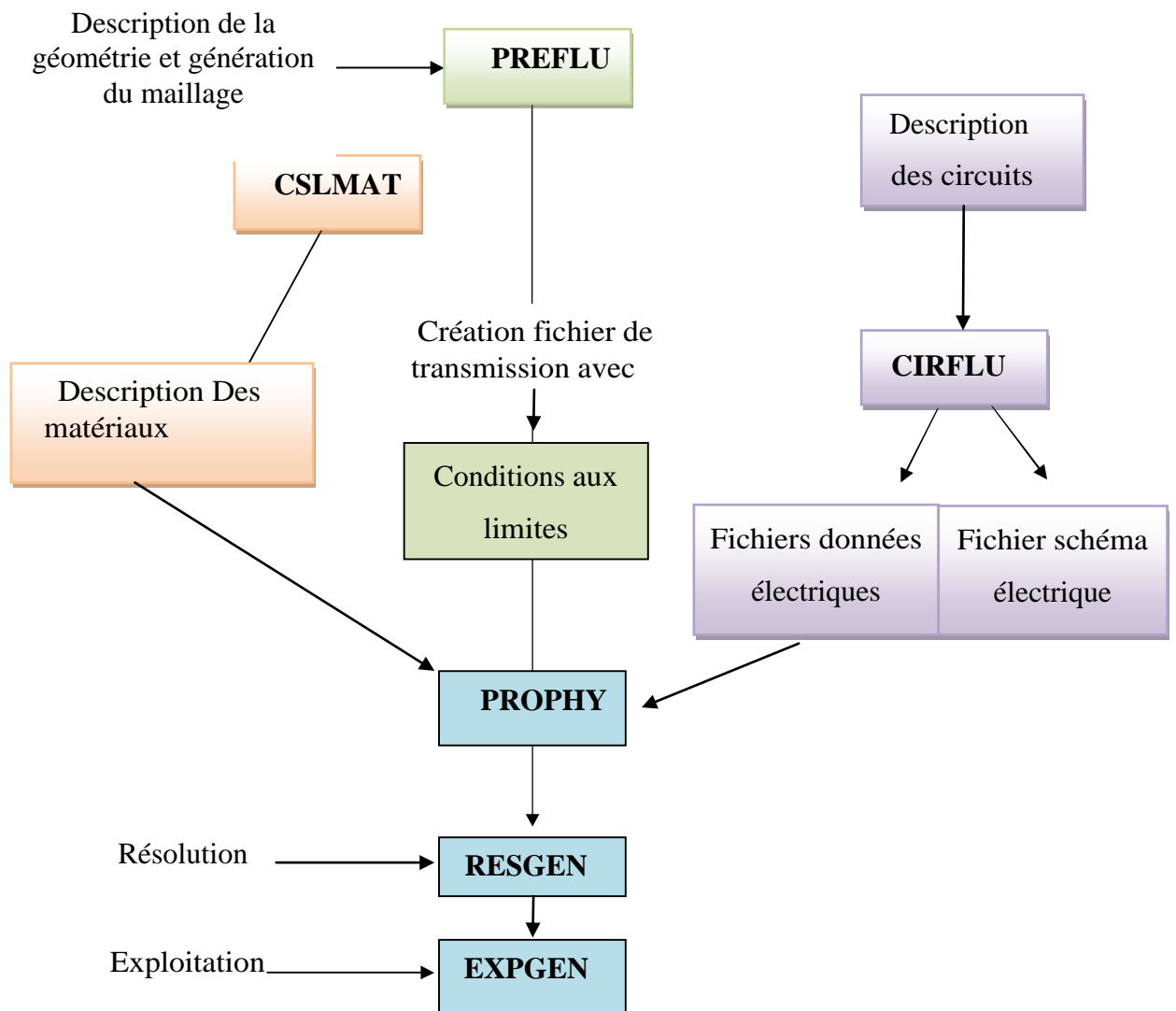


Figure 2. 2. Schéma des différents modules du logiciel Flux-2D

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 [17]:

- 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 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons basé sur les méthodes et les techniques de la modélisation et des outils de la simulation de la MADA. Pour la résolution des équations des champs électromagnétique on a passe par Conception assisté par ordinateur CAO est un moyen de simulation permettant la définition de la structure du dispositif à concevoir, son dimensionnement et la détermination de ces performances à partir de ces spécifications géométriques.

En suite, nous allons présenter le modèle mathématique des équations de Maxwell qui régit tous les phénomènes électromagnétiques de tous dispositifs même la méthode des éléments finis est basée sur la résolution numérique des équations de Maxwell, Elle permettre d'effectuer une modélisation globale qui prend en compte les effets combinés des différents phénomènes.

Le logiciel Flux 2Dse modélise par éléments finis prenant en compte les phénomènes magnétiques et thermiques et permettant des régimes évolutifs.

3.1 Introduction

La résolution du système d'équation issu de la discrétisation par les éléments finis, permet de calculer le potentiel vecteur en chaque nœud du maillage. Dans cette partie, nous allons étudier la machine dans les deux cas de fonctionnement : à vide et en charge et dans le cas d'une machine saine (sans défaut) et avec déséquilibre de réseau.

3.2 Structure du circuit magnétique de la machine

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est décrite à l'aide des points, des segments droits et d'arcs. La topologie de la machine utilisée est présentée à la Figure 3.1 Les bobinages sont de type distribué et logés dans des encoches, dont le nombre sera analysé ultérieurement. On considère de manière générale l'existence de becs d'encoches, bien qu'ils soient le plus souvent absents dans les machines de grande puissance afin de permettre l'insertion de bobinages préformés dans les encoches. Les becs peuvent être utilisés pour fermer plus ou moins la fenêtre des encoches au voisinage de l'entrefer.

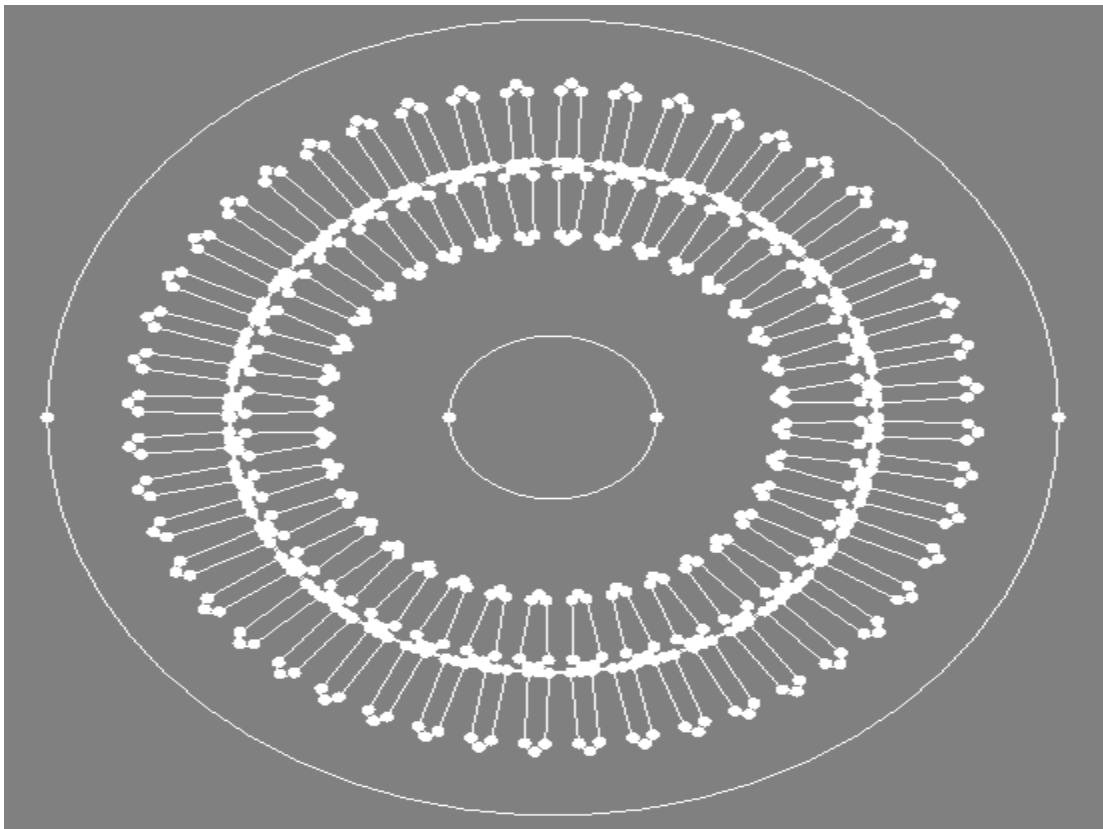
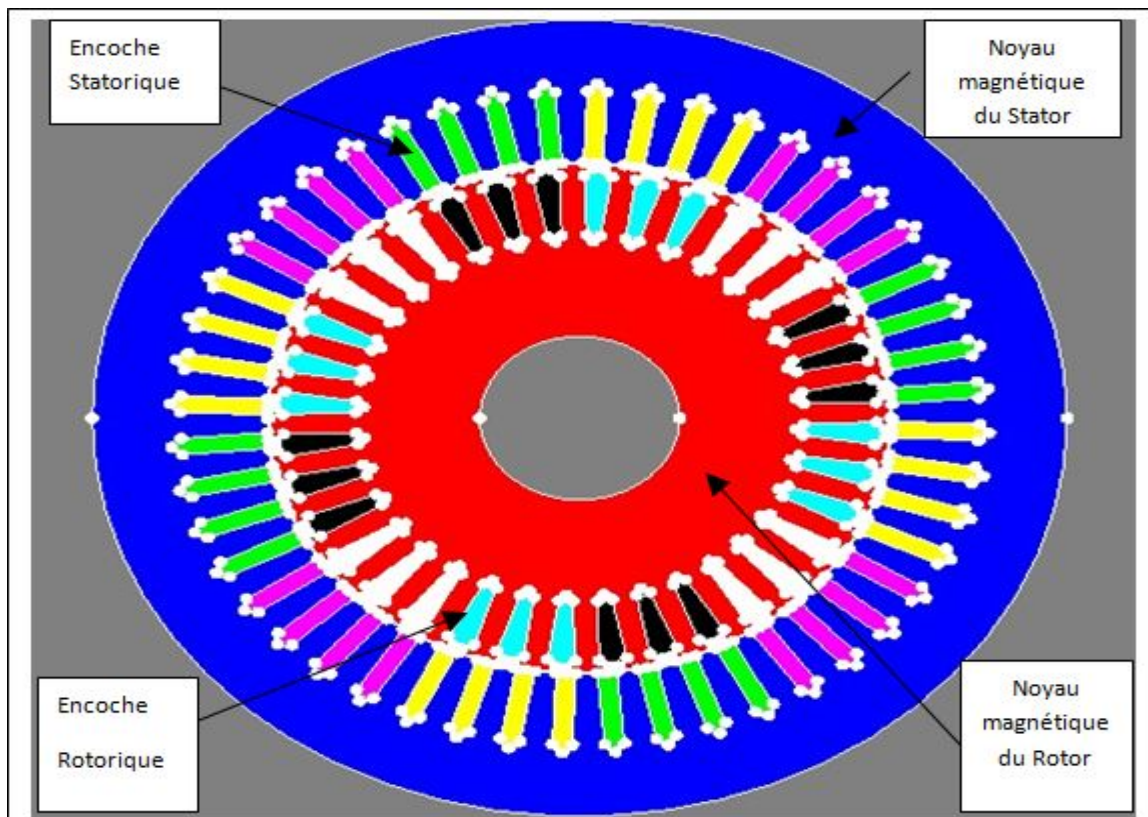


Figure 3.1. Structure du circuit magnétique et caractérisation de la géométrie de la MADA.

3.3 Phase de préparation

Cette phase préparatoire est consacrée à la définition des domaines, Le modèle éléments finis correspond à notre machine a double alimentation de 380 V, 50 Hz et 4 pôles représentée par la figure 3.2, (une description complète de la machine est donnée en annexe). Le domaine de calcul 2D, contient:

- **Stator** contient une culasse qui est définie par un matériau magnétique caractérisé par une courbe d'aimantation $B(H)$, avec un diamètre interne 158.80mm et externe 247.65mm et 48 encoches statoriques qui sont définies par un matériau non magnétique
- **Entrefer** d'épaisseur égale à 0.44 mm
- **Rotor** contient des bobines court-circuit avec un diamètre interne 157.87 mm et externe 247.65mm et 36 encoches rotorique qui sont définies par un matériau non magnétique



(a)

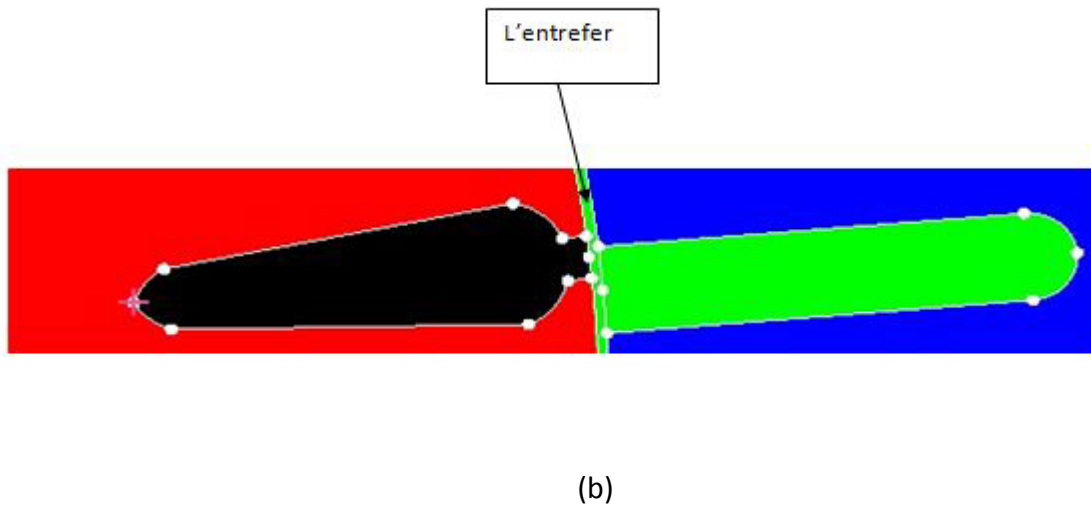


Figure 3.2. (a) Régions du domaine de calcul du champ électromagnétique, (b) Zoom de région

3.4 Structures des bobinages d'une MADA

Pour identifier la méthode de bobinage dans le logiciel Flux généraliste consiste à rassembler les régions géométriques correspondant à une phase et à leur affecter un composant du circuit externe. On indique alors le sens des conducteurs et le nombre de spires traversant la région.

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

Le bobinage de type ondulé est employé principalement au rotor, pour diminuer le nombre d'interconnexions entre les groupes de bobines qui sont montées sur une partie tournante. Le pas des bobines (ou pas du bobinage) est dit fractionnaire, ou raccourci par rapport au pas polaire, pour réduire le contenu harmoniques de la FMM produite comme nous le verrons plus loin. Le raccourcissement du pas réduit également la longueur des têtes de bobine et en conséquence la résistance de phase sauf pour le bobinage de type ondulé [85]. Il est possible de concevoir un bobinage à simple couche à pas raccourci, mais cela nécessite des longueurs différentes entre les têtes des bobines de la même phase. Des bobinages à simple couche semblent être utilisés au rotor des MADA par l'industrie. [29]

La Figure 3.3 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 :

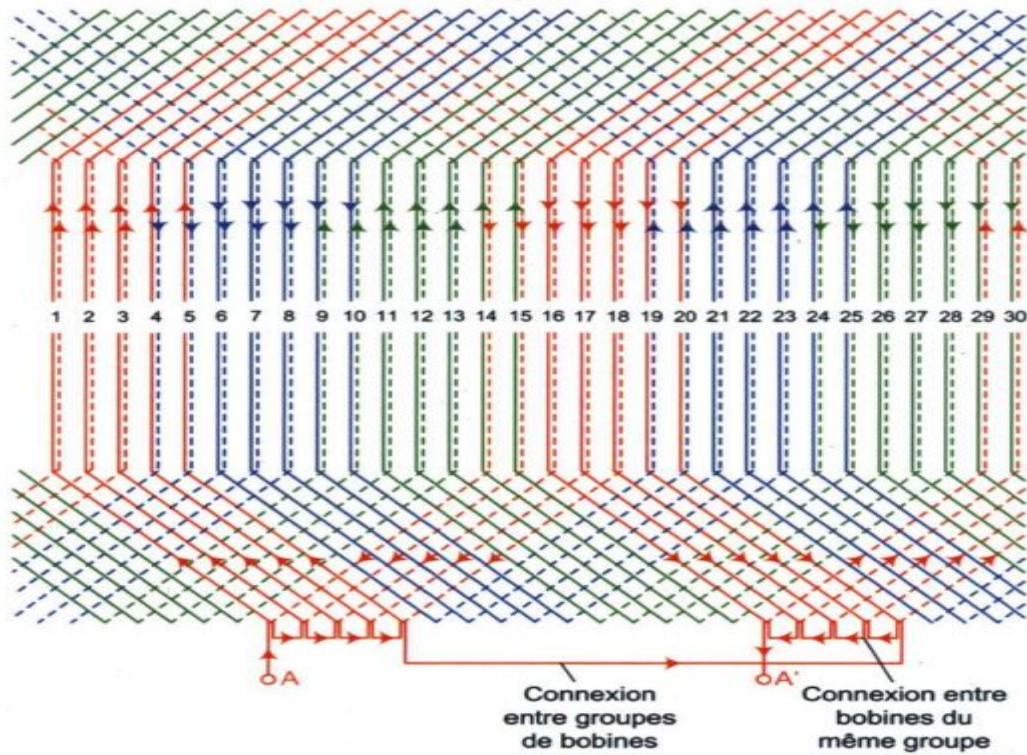


Figure 3.3. Bobinage triphasé représente deux pas polaires.

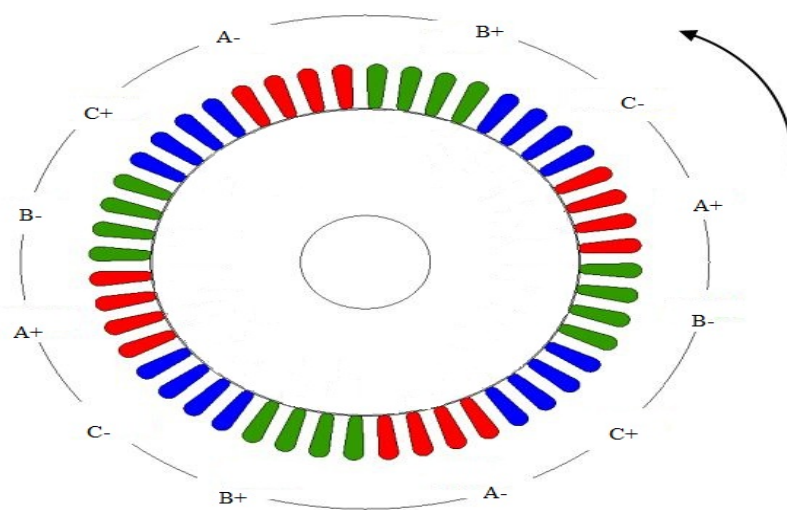


Figure 3.4. Répartition du bobinage statorique

3.5 Création des matériaux

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

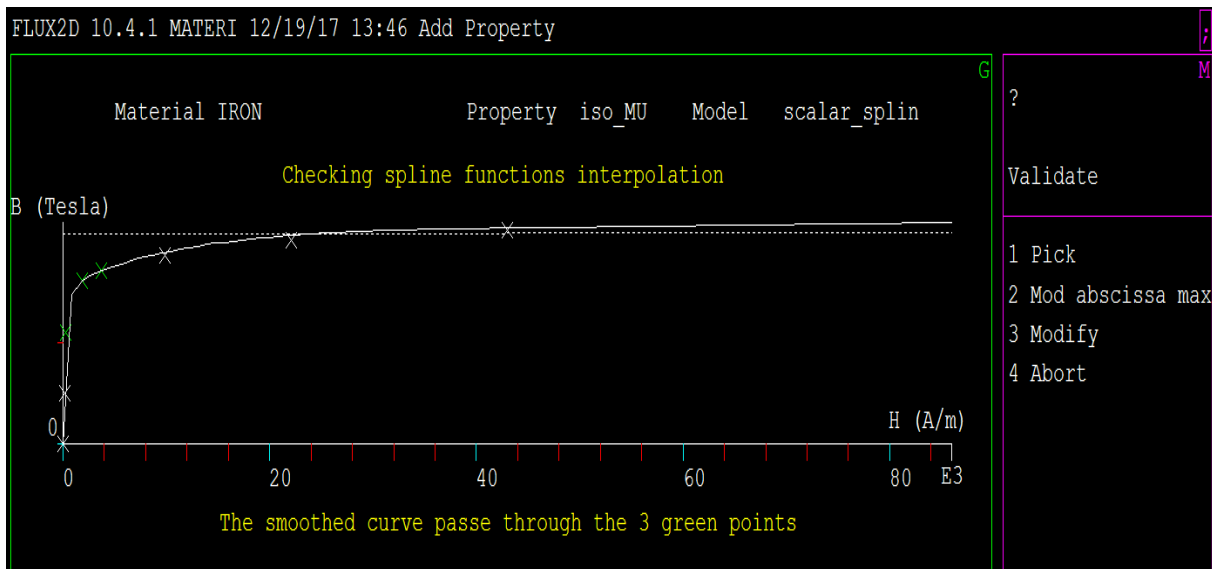


Figure 3.5. Caractéristiques B(H) du matériau magnétique

La définition métier des matériaux est proche de celle utilisée dans Flux. En effet de nombreux modèles de courbes B(H) existent déjà dans Flux. Cependant, on pourra différencier, dans le cadre d'une définition métier, les matériaux magnétiques durs des matériaux magnétiques doux. De plus, alors que le calcul des pertes est réalisé en post-processing dans Flux.

3.6 Circuit électrique

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

Le circuit représente :

- les sources de tension d'alimentation (V1 V2 V3)
- Les bobinages statoriques (B1 B2 B3 B4 B5 B6 B7 B8 B9 B10 B11 B12)
- Les bobinages rotoriques (B13 B14 B15 B16 B17 B18 B19 B20 B21 B22 B23 B24)
- les Inductances de fuite (L1 L2 L3 L4 L5 L6)
- résistances de chute de tension (R1 R2 R3 R4 R5 R6)

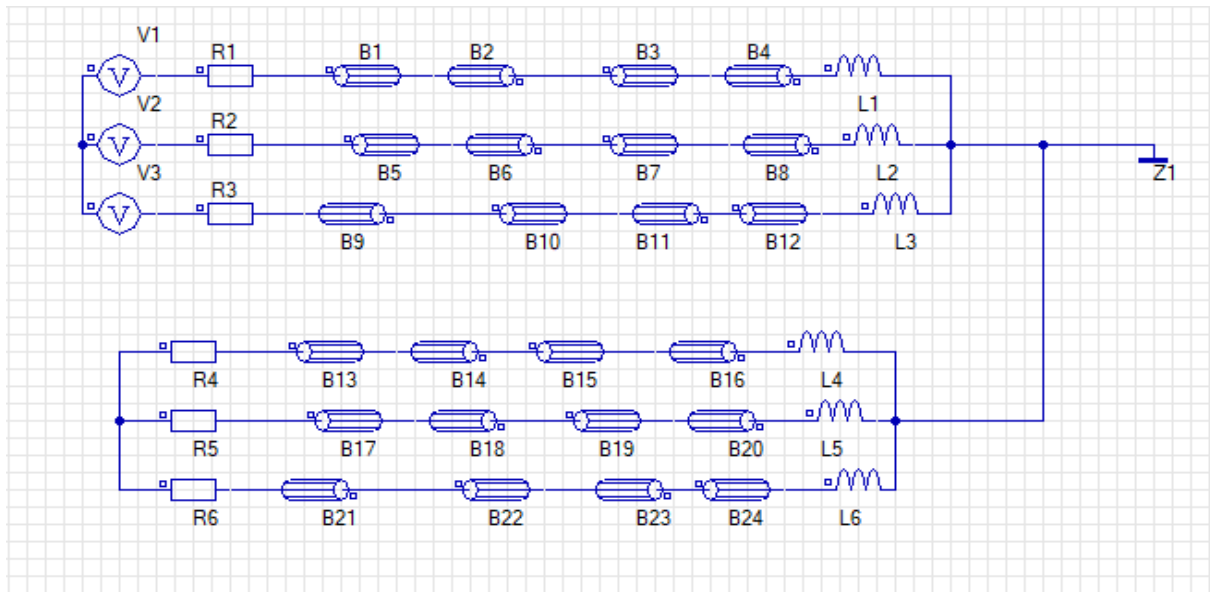


Figure 3.6. Représentation de circuit électrique

3.7 Le maillage

Le maillage du circuit magnétique, est présenté dans la figure 3.8 Le maillage comporte 35918 éléments surfaciques et 72156 nœuds. 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 statoriques (voir Figure 3.7). Ces paramètres sont nécessaires pour assurer un compromis raisonnable entre la précision et la rapidité de calcul numérique.

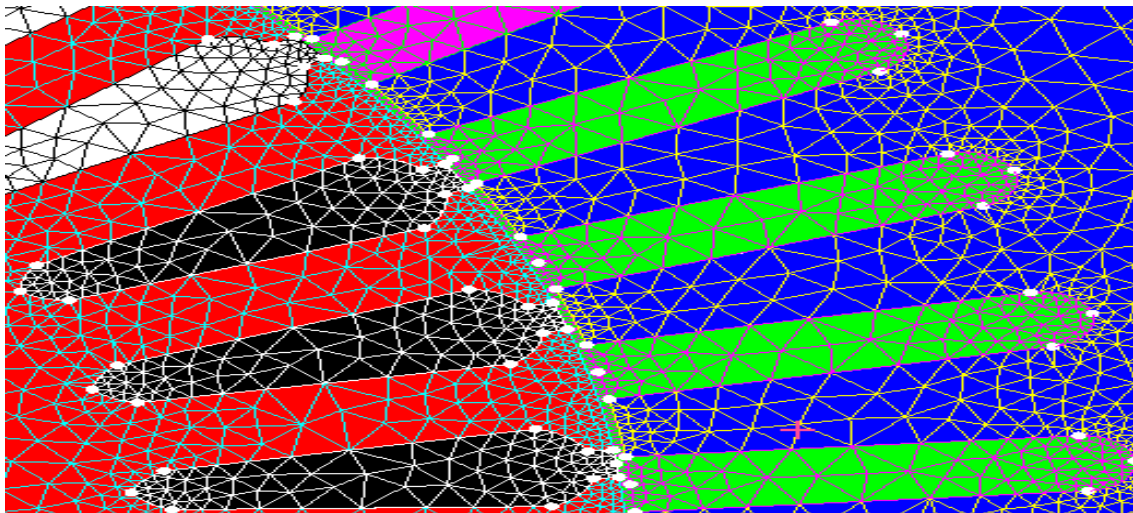


Figure 3.7. Répartition du maillage dans l'entrefer.

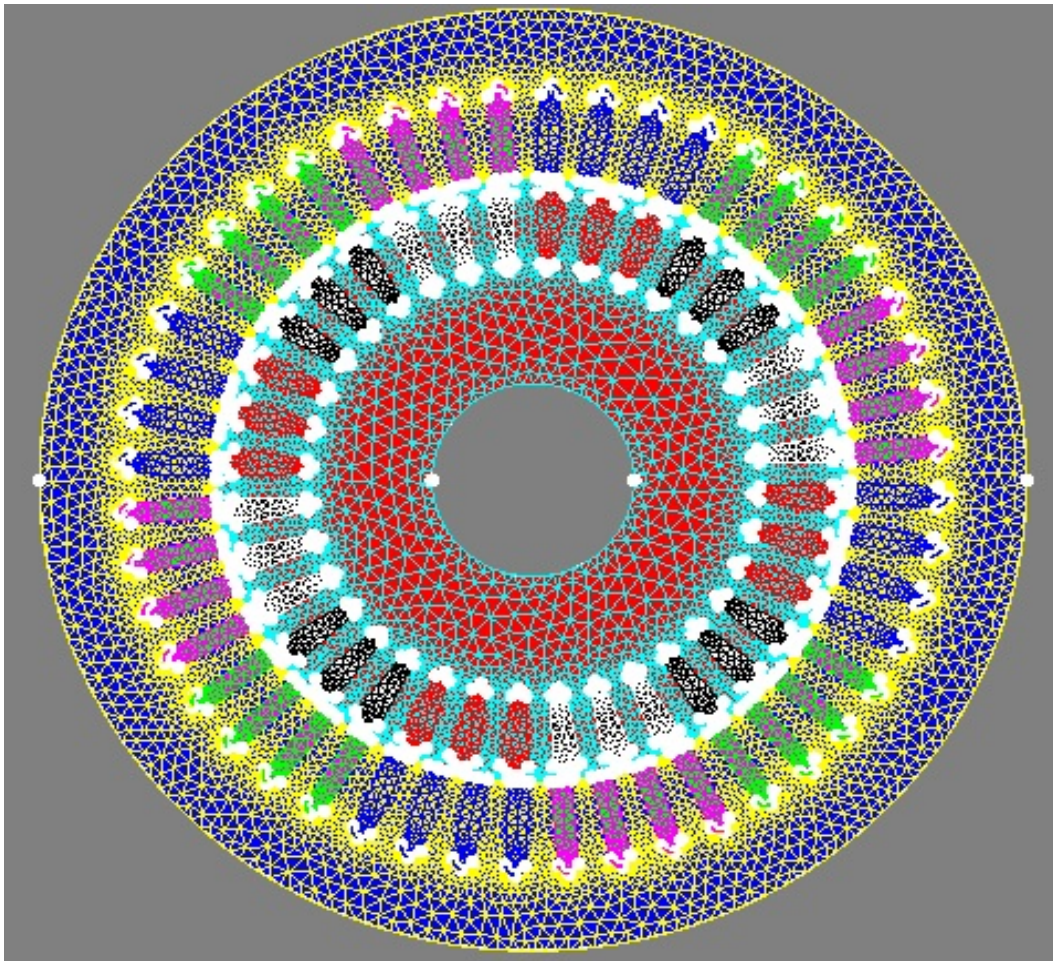


Figure 3.8. Le maillage effectué sur le circuit magnétique de la machine.

Le système est discrétiser par des segments et des arcs spécifier la forme des éléments, Le maillage à des différentes faces qui sont limité est découpé en élément finis.

On impose la méthode utilisée pour constituer le maillage par logiciel pour le découpage

Le maillage est plus dense au voisinage de l'entrefer puisque dans cette région se développe l'énergie électromagnétique. Par contre le maillage est plus grossier vers l'arbre et vers l'extérieur de la culasse pour alléger les temps de calcul sans perte sensible d'information.

La carcasse externe de la machine étant conductrice et généralement reliée à la terre

3.8 Simulation du modèle par la méthode des éléments finis

Les éléments des circuits électriques sont affectés vers le circuit magnétique.

La magnétisation de la machine à l'état initial est faite par une résolution en magnétodynamique.

Ainsi à partir d'un modèle magnétodynamique pas à pas dans le temps, on peut obtenir des représentations de la répartition de lignes équiflux.

La figure 3.9 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. La répartition de l'induction dans la figure 3.10 est, elle aussi, quasi-symétrique.

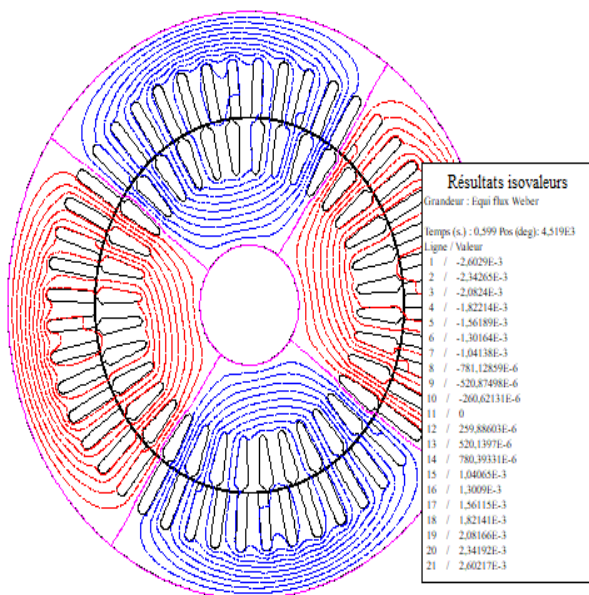


Figure 3.9. Répartition des lignes équiflux

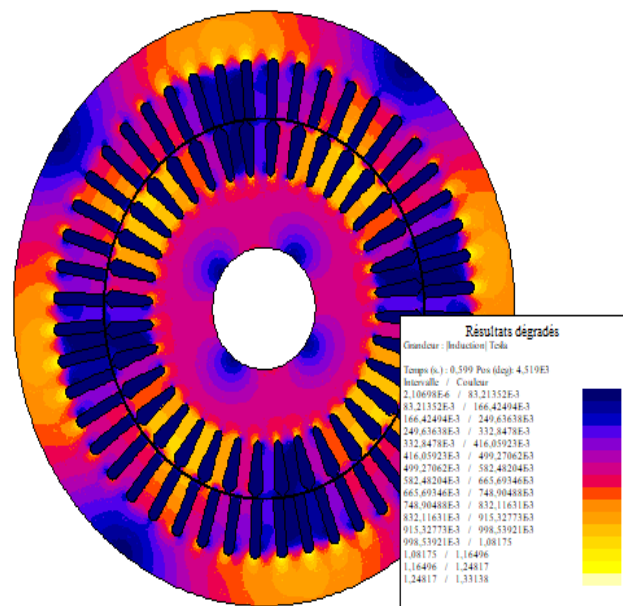


Figure 3.10. L'induction magnétique

3.9 Résultats de simulation de fonctionnement à vide

Nous avons simulé le fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation en régime sain et en défaut de déséquilibre "tension" par le modèle magnétostatique disponible dans logiciel avec une tension de 380 v

3.9.1 Tension équilibré

On a simulé le comportement de la machine dans le cas où le couple résistant est nul et les tensions et les trois tensions en équilibre

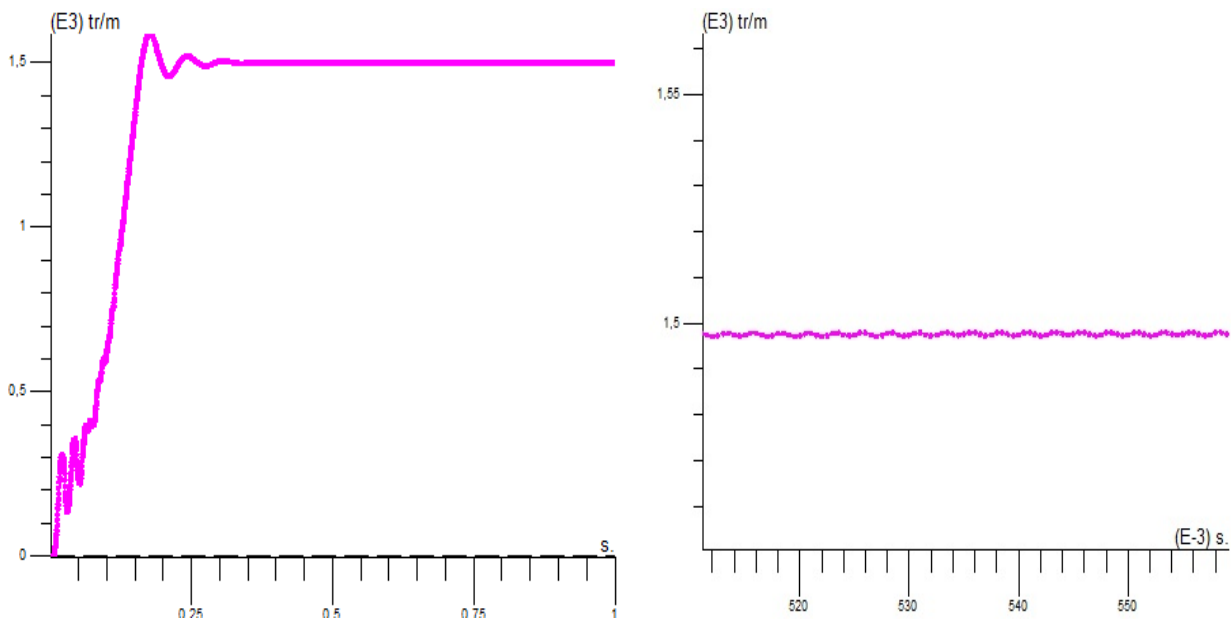


Figure 3.11. Courbe de la vitesse

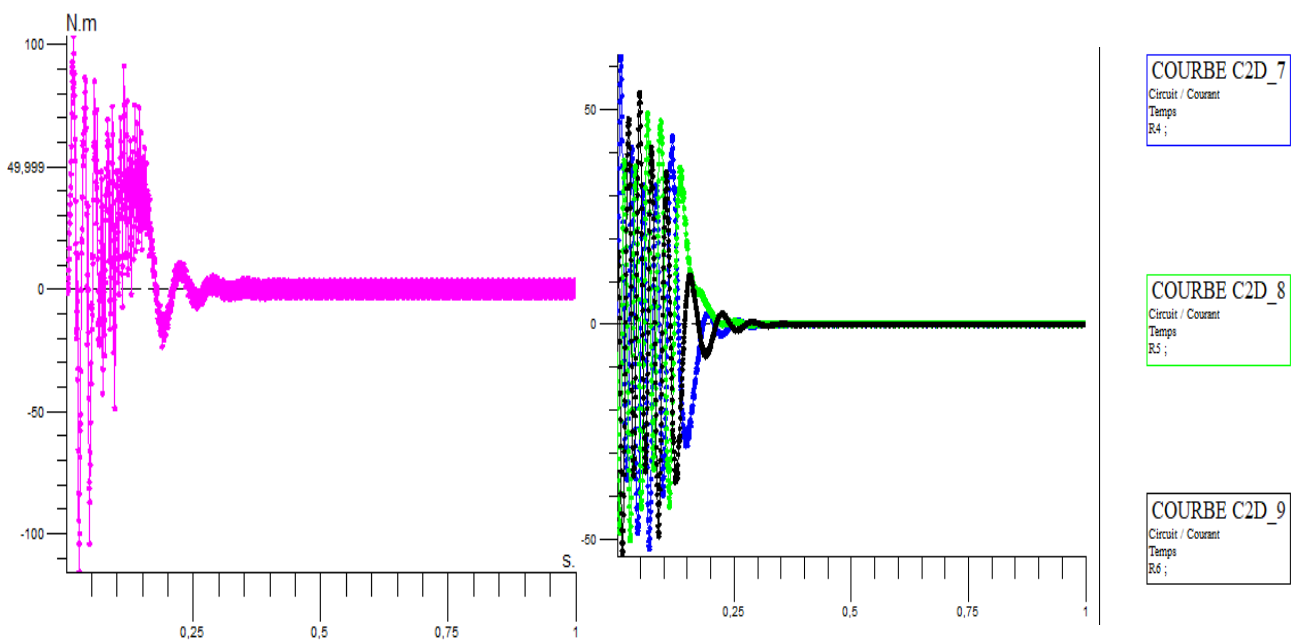


Figure 3.12. Courbe du couple et des courants rotoriques

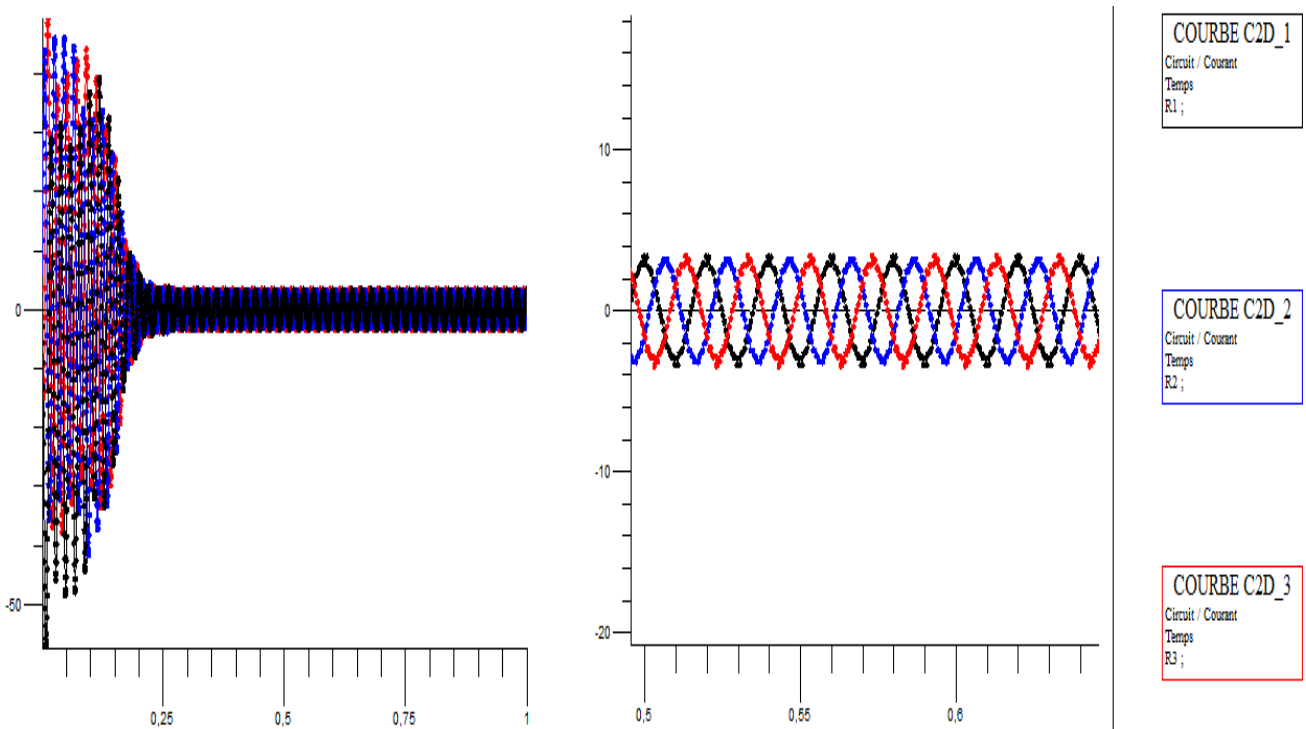


Figure 3.13. Représentation les courants statorique superposé

3.9.2 Tension déséquilibré

Pour d'écrire le comportement de la machine asynchrone à double alimentation avec un défaut de déséquilibre dans la phase (a)

($V_a=280\text{ v}$; $V_b=380\text{ v}$; $V_c=380\text{v}$)

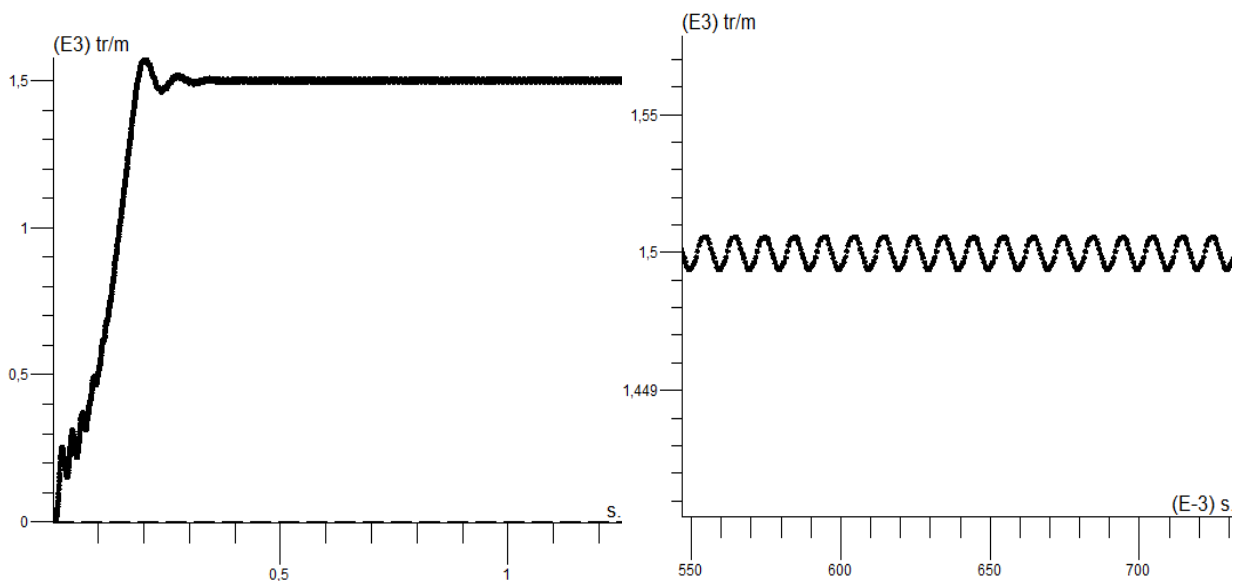


Figure 3.14. Courbe de la vitesse

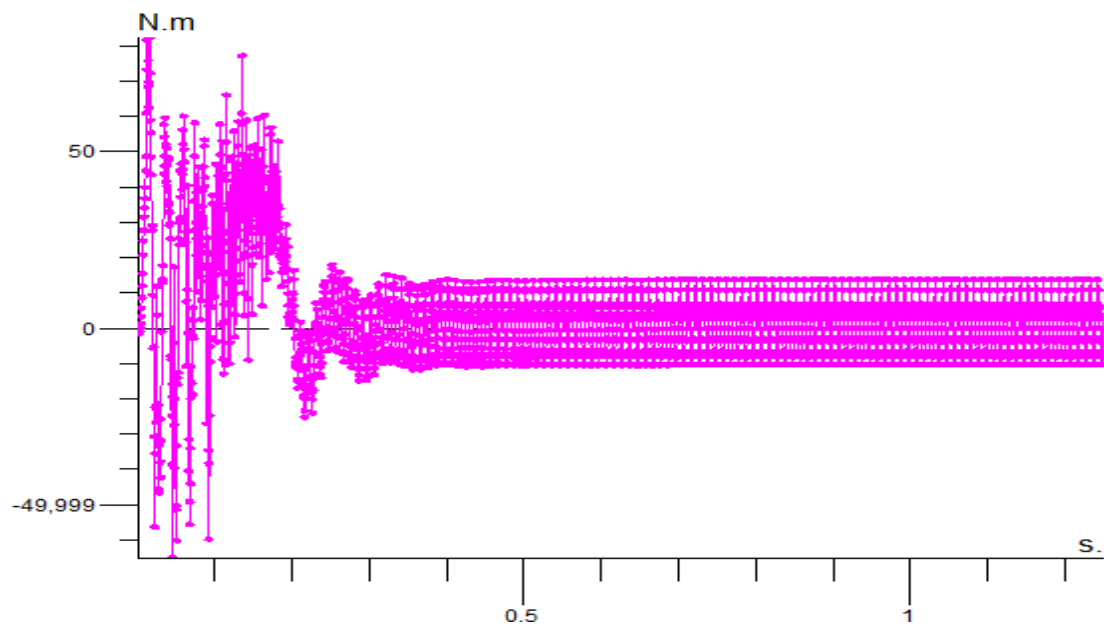


Figure 3.15. Courbe du couple

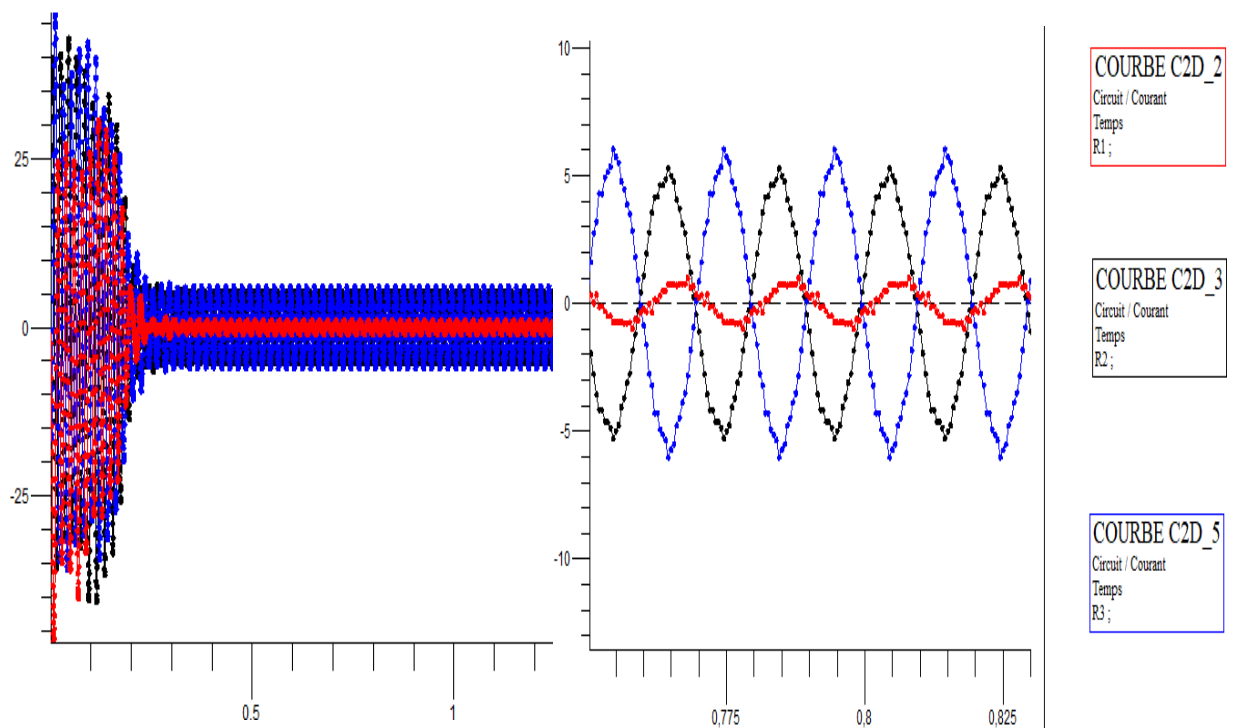


Figure 3.16. Représentation les courants statorique superposé

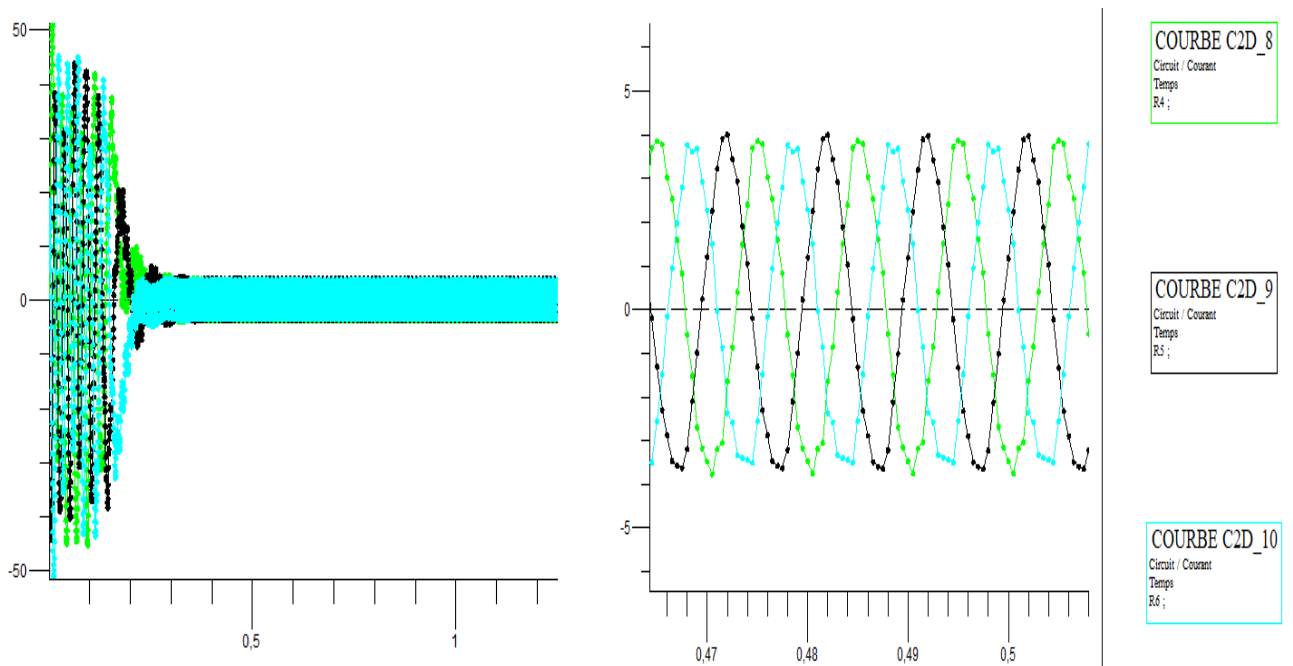


Figure 3.17. Représentation des courants rotoriques superposés

3.9.3 Interprétation des résultats

Dans le cas de démarrage à vide, on constate un fort appel de courant statorique pour créer un couple de démarrage qui s'élève à une valeur maximale de 100 N.m

L'oscillation du couple est l'élément marquant pendant le régime transitoire (le régime transitoire jusqu'à 0,4 s), à cause de l'échange d'énergie électromagnétique entre le stator et le rotor.

Les oscillations du couple se font ressentir sur l'évolution de la vitesse qui oscille légèrement en régime transitoire avant de stabiliser à environ 1500 tr/min

Lorsque la vitesse de rotation atteint la vitesse de synchronisme, le couple électromagnétique commence à décroître jusqu'à 0 N.m, cette baisse est due à la diminution des courants statoriques et rotoriques

Au régime déséquilibré on remarque une augmentation des courants statoriques au niveau du 2^{ème} et 3^{ème} phase à cause de la diminution de la tension dans la 1^{ère} phase, cette perturbation crée des oscillations au niveau du couple électromagnétique et la vitesse de rotation au niveau du régime permanent.

On constat aussi qu'il ya une variation sinusoïdal des courants rotorique, à cause de changement des courants statorique 'induction magnétique'

3.9.4 Résultat de l'analyse spectrale par FFT

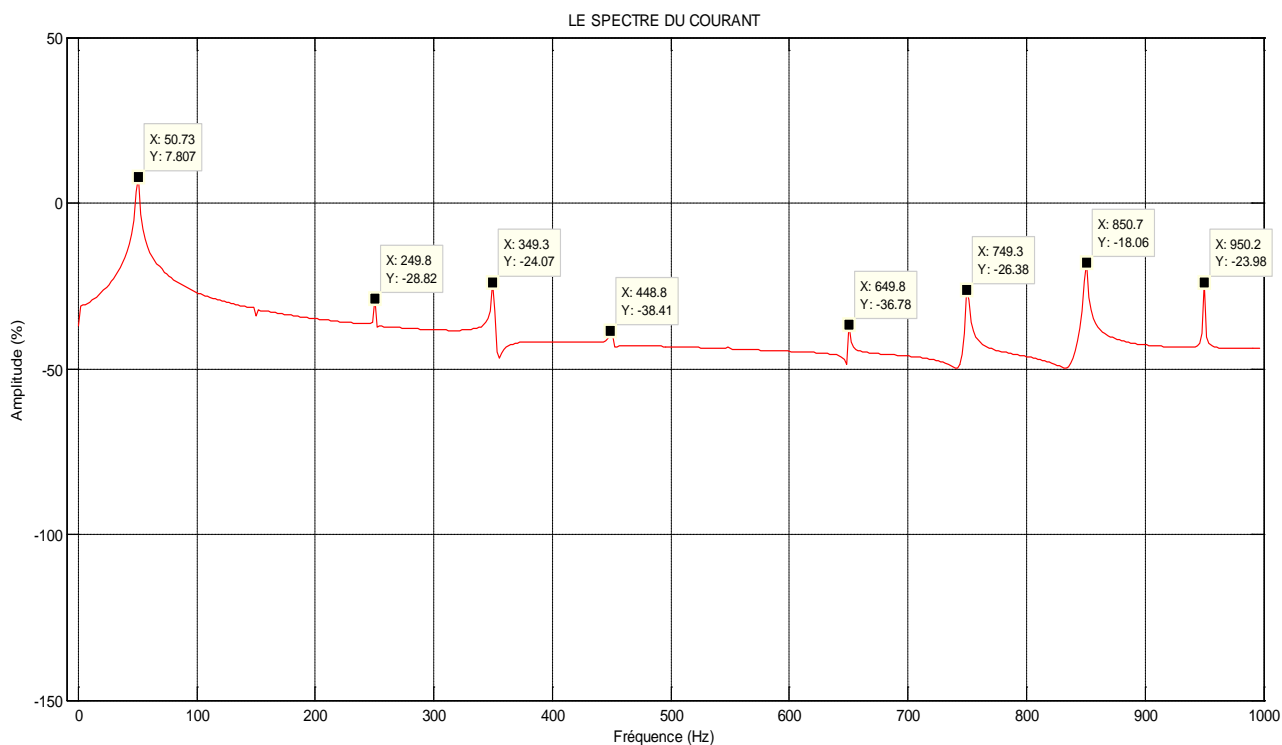


Figure 3.18. Les spectres du courant statorique à vide avec tension équilibré

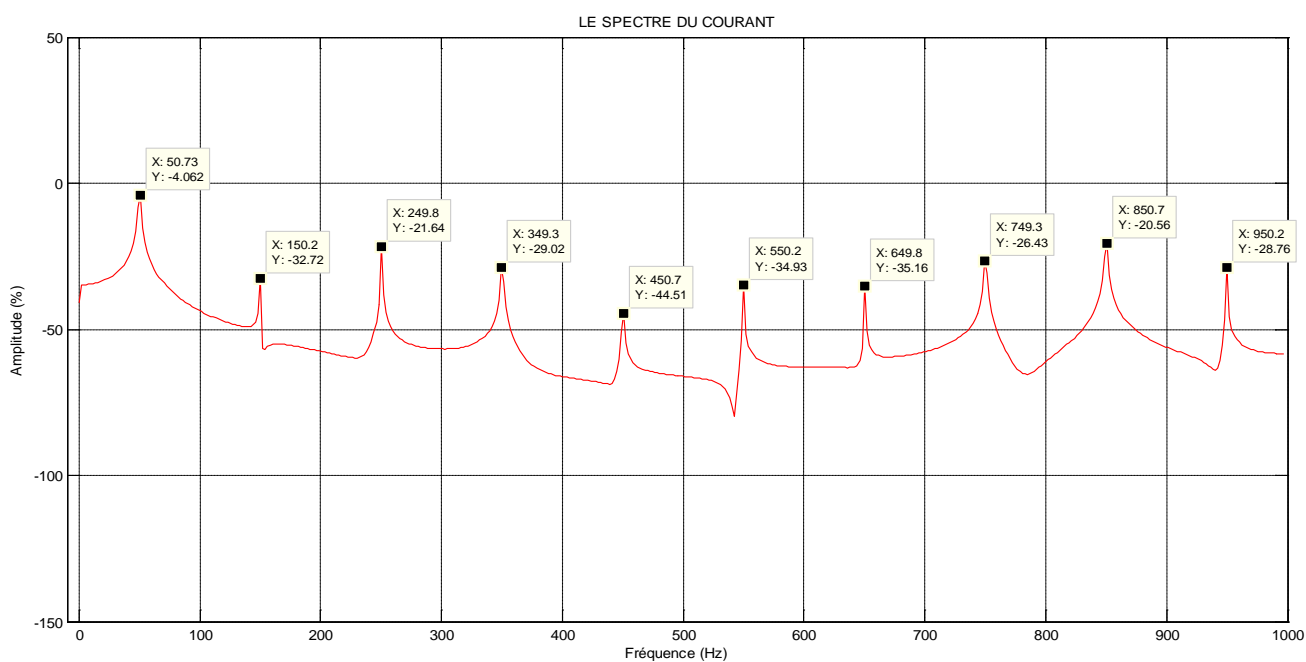


Figure 3.19. Les spectres du courant statorique à vide avec tension déséquilibré

3.9.5 Interprétation de l'analyse spectrale

Pendant le fonctionnement de la MADA, des phénomènes divers entrent en jeu affectent particulièrement les courants d'alimentation en modifiant leur contenu spectral.

Le recours à la Transformée de Fourier Rapide (FFT) dans cette étude nous permet d'analyser le courant statorique de la machine saine et avec défauts.

Présentent respectivement les spectres du courant statorique pour les deux cas; équilibré et déséquilibré. 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. $(f_{dés} = K.fs) k= 1 3 5 .$

3.10 Résultat de simulation de fonctionnement en charge

Sous les mêmes tensions (380v), nous avons présenté sur les figures suivantes, les caractéristiques de la machine en charge dans deux cas :

3.10.1 Tension équilibré

On alimente la machine par trois tension équilibré ($V_a=380\text{ v}$; $V_b=380\text{ v}$; $V_c=380\text{ v}$) et on applique une charge résistive de (6 N.m)

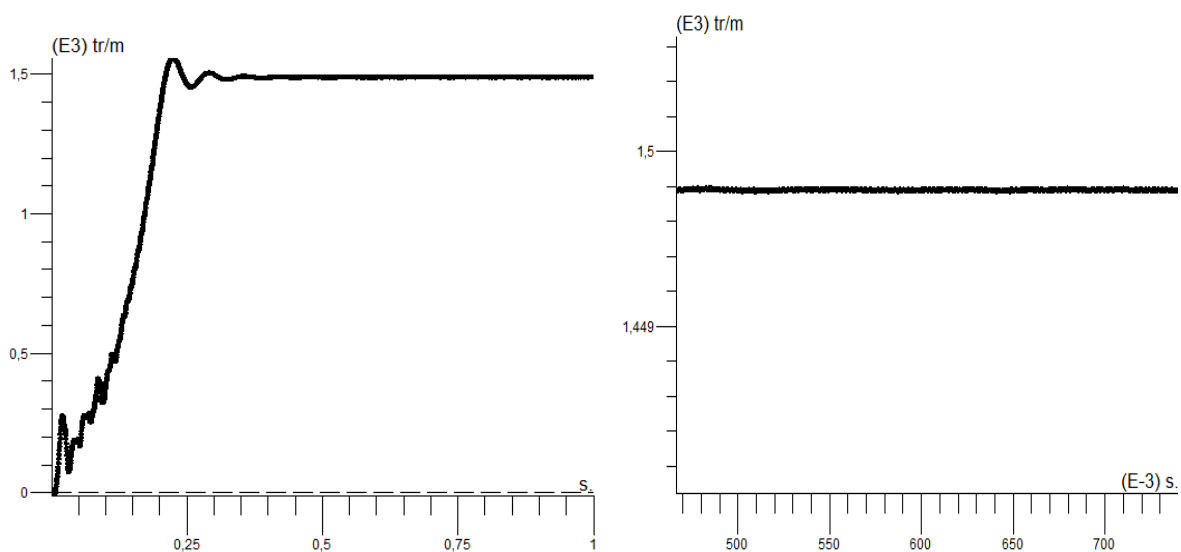


Figure 3.20. Courbe de la vitesse

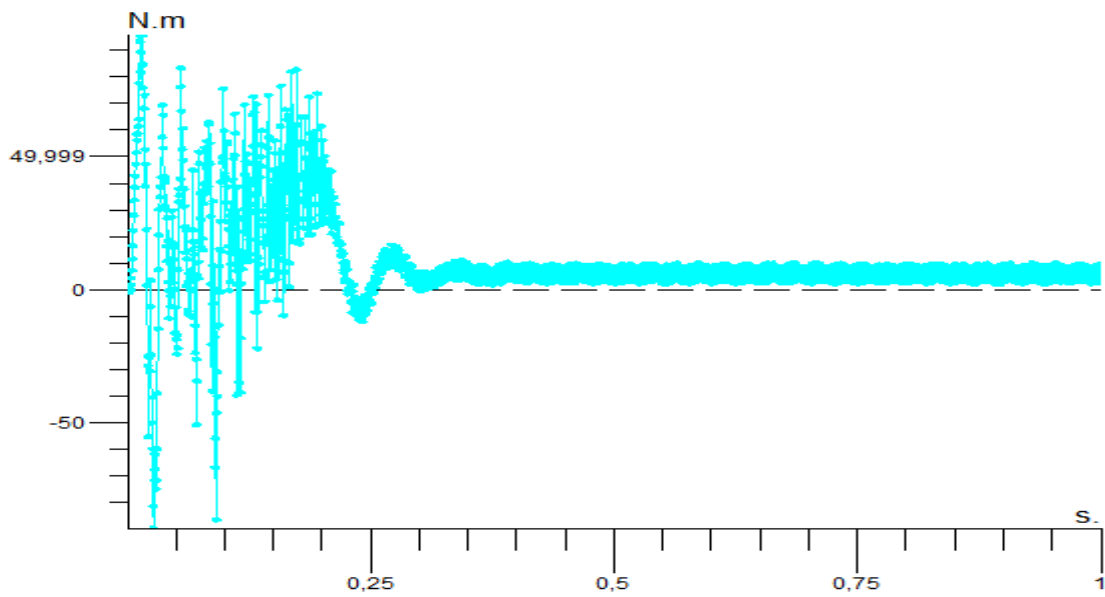


Figure 3.21. Courbe du couple

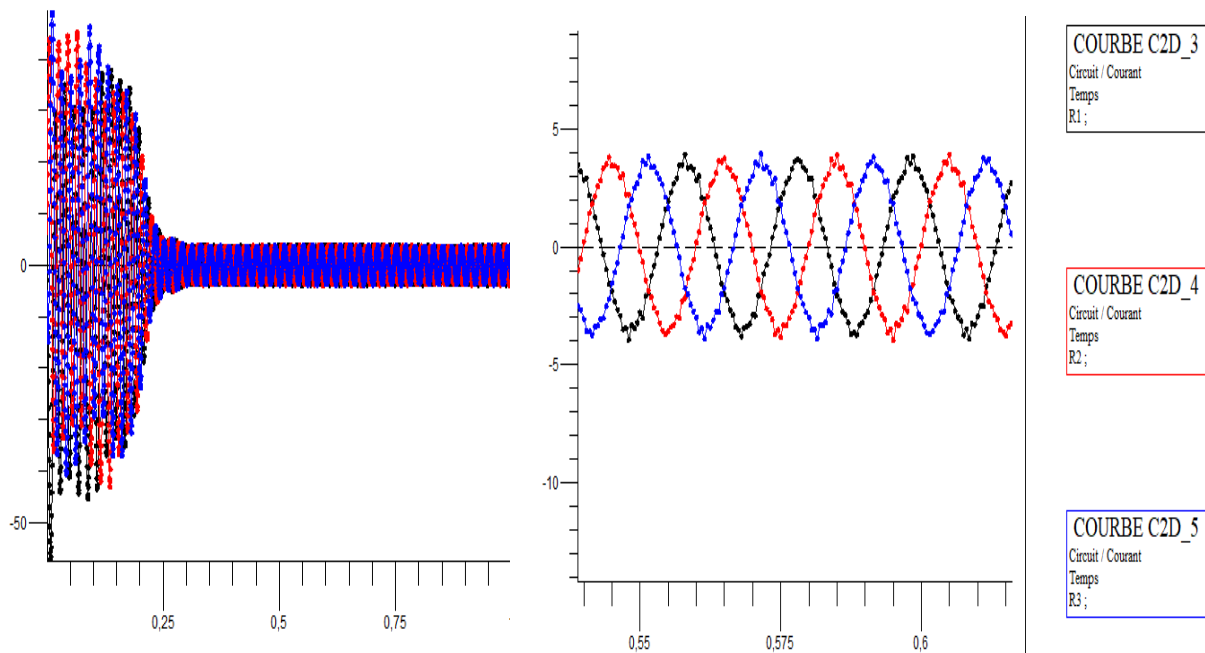


Figure 3.22. Représentation les courants statorique superposé

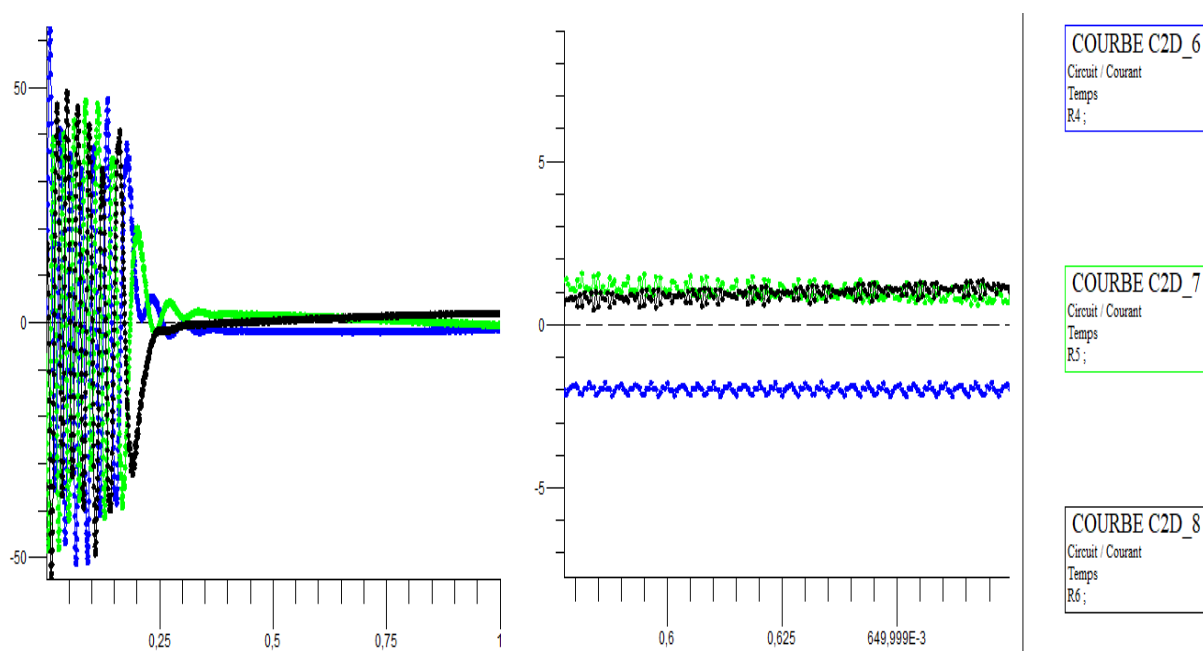


Figure 3.23. Représentation les courants rotorique superposé

3.10.2 Tension déséquilibré

On a changer la valeur de tension dans la phase a ($V_a=280\text{ v}$; $V_b=380\text{ v}$; $V_c=380\text{ v}$)

avec même couple résistive.

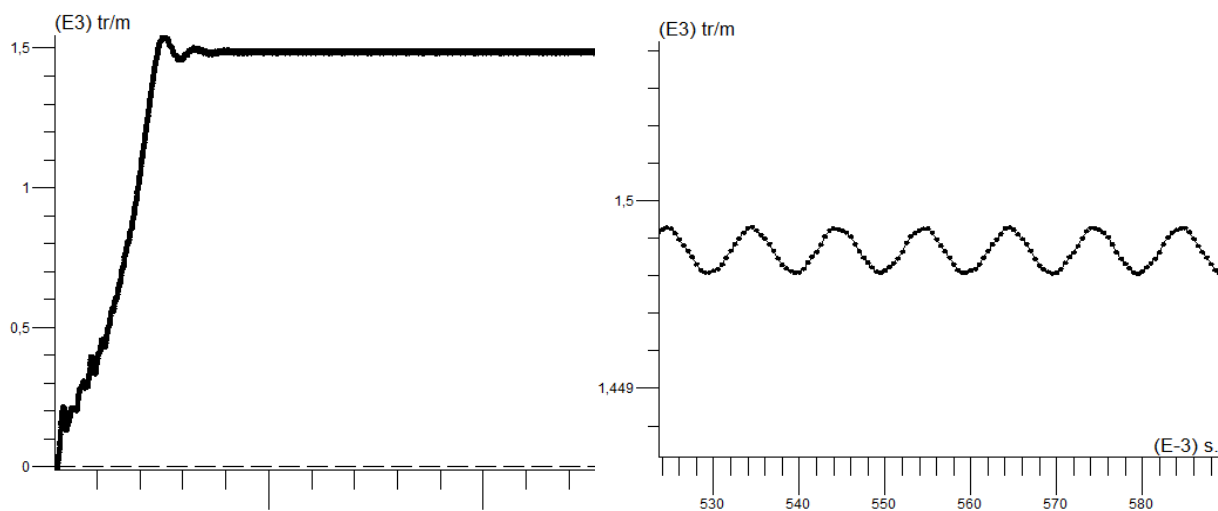


Figure 3.24. Courbe de la vitesse

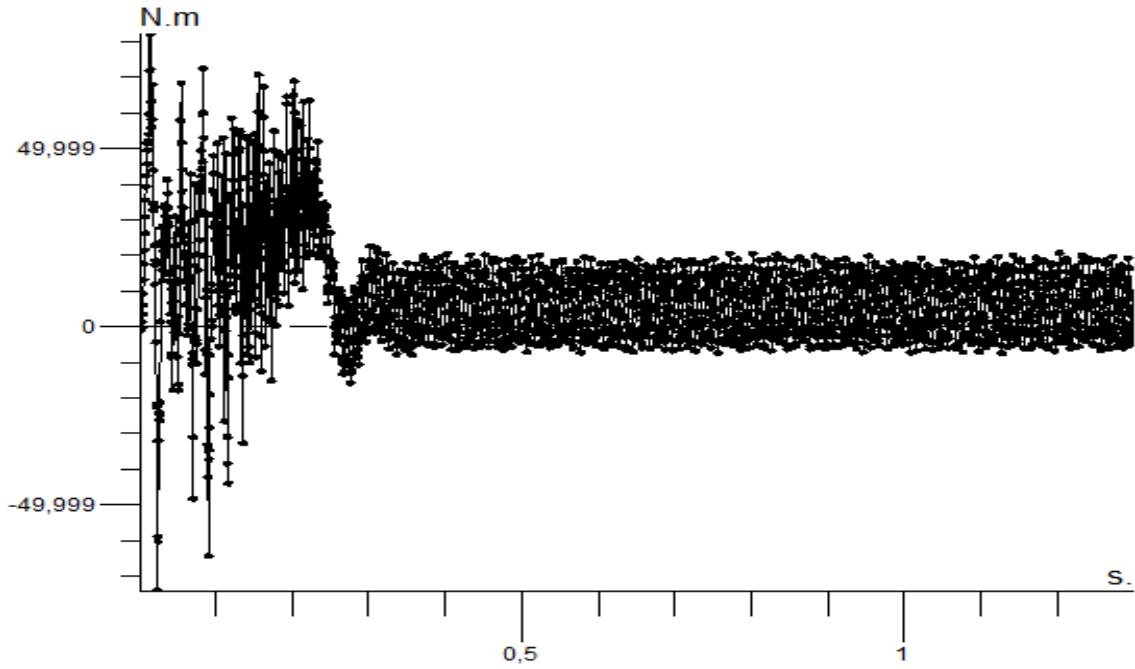


Figure 3.25. Courbe du couple

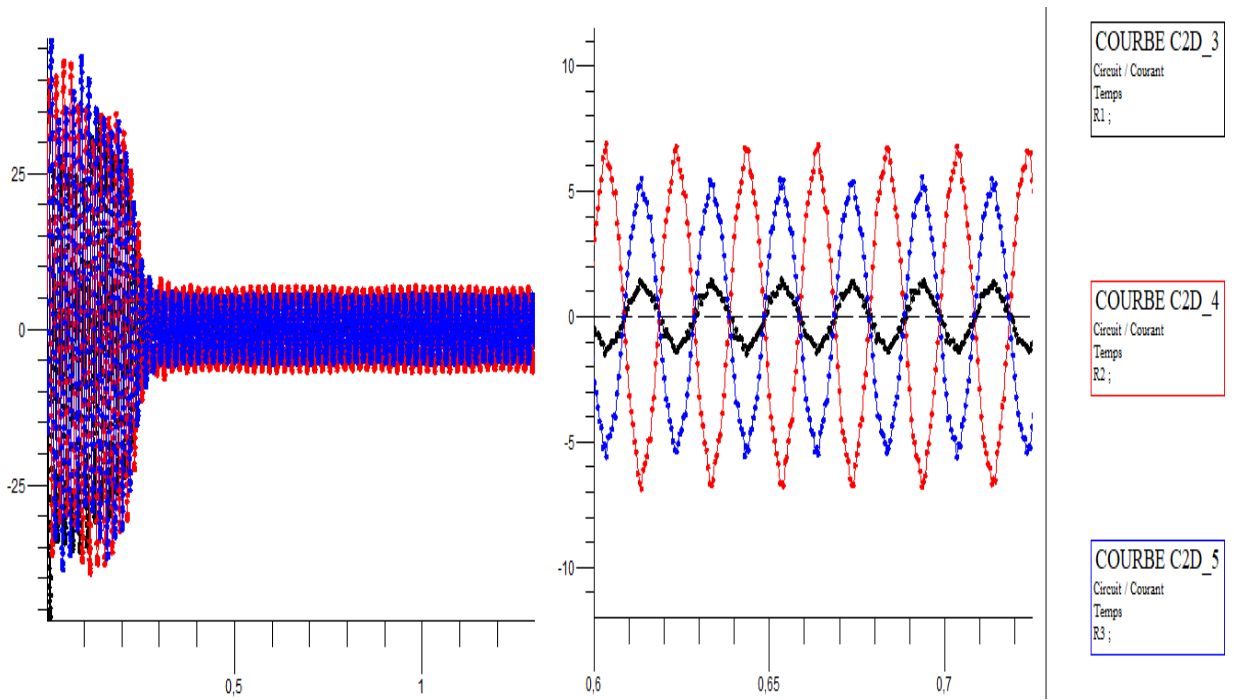


Figure 3.26. Représentation les courants statorique superposé

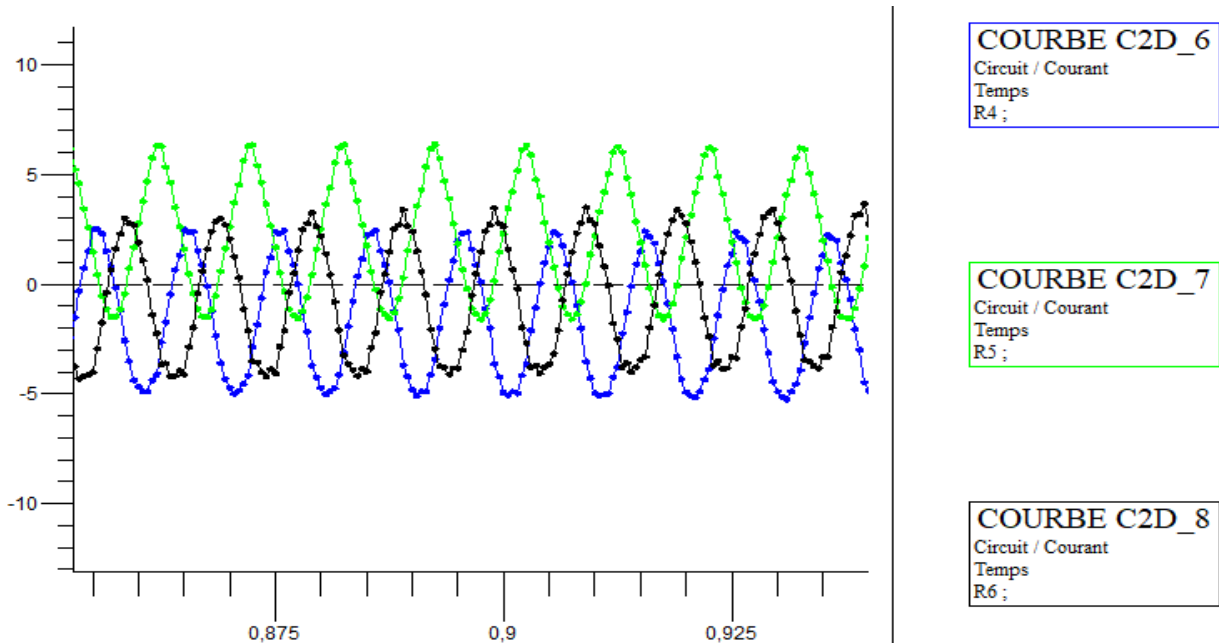


Figure 3.27. Représentation les courants rotorique superposé

3.10.3 Interprétation des résultats

Avec l'application d'une charge de valeur (6N.m) en équilibre le couple électromagnétique tend vers la valeur de couple résistant en régime permanent. On remarque une diminution de la vitesse de rotation et une augmentation des amplitudes des courants statorique et rotorique.

On remarque aussi que la forme des courants rotoriques n'est pas sinusoïdale

Les mêmes remarques en déséquilibre à vide, sauf qu'on a constaté ceci :

- Une augmentation d'amplitude des courants statorique.
- Plus des vibrations de couple.
- Une petite diminution de la vitesse à cause de la charge.

3.10.4 Résultat de l'analyse spectrale par FFT

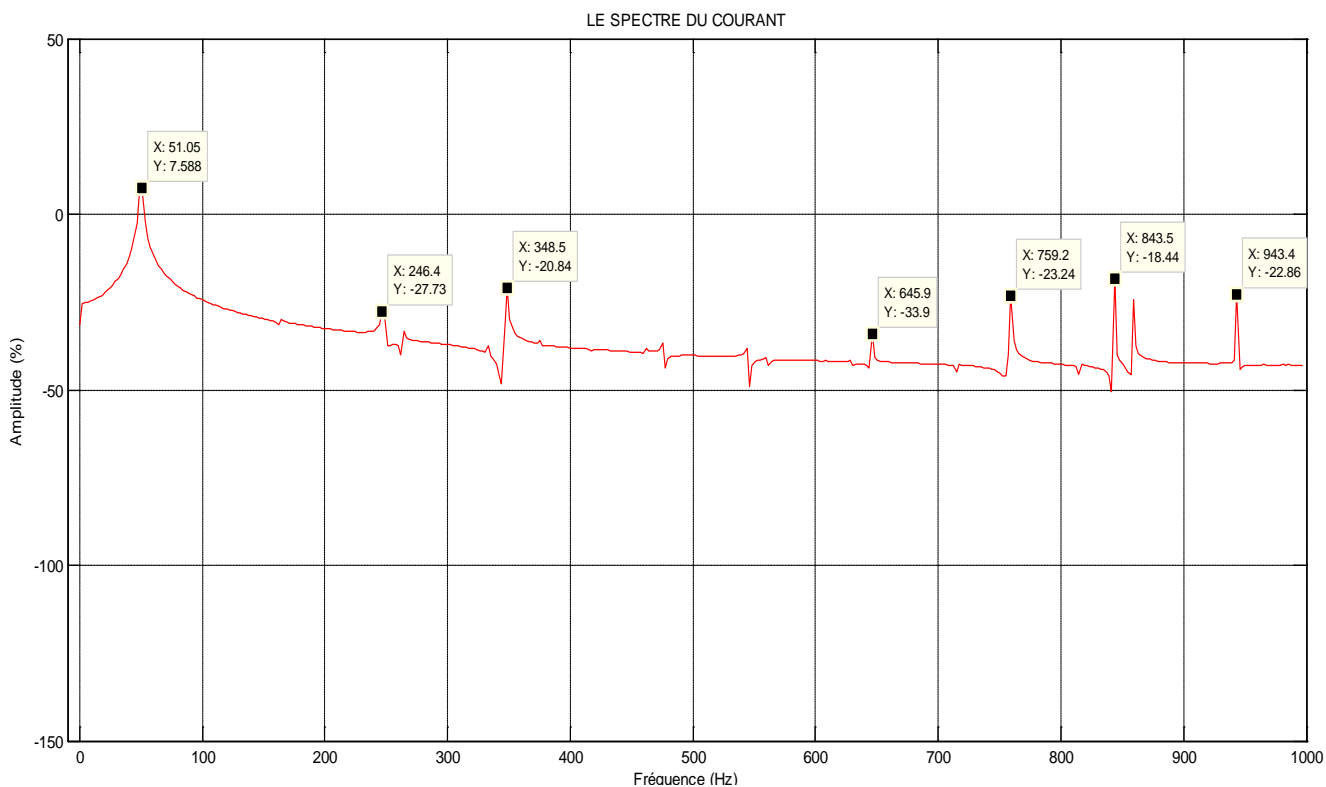


Figure 3.28. Les spectres du courant statorique en charge avec tension équilibré

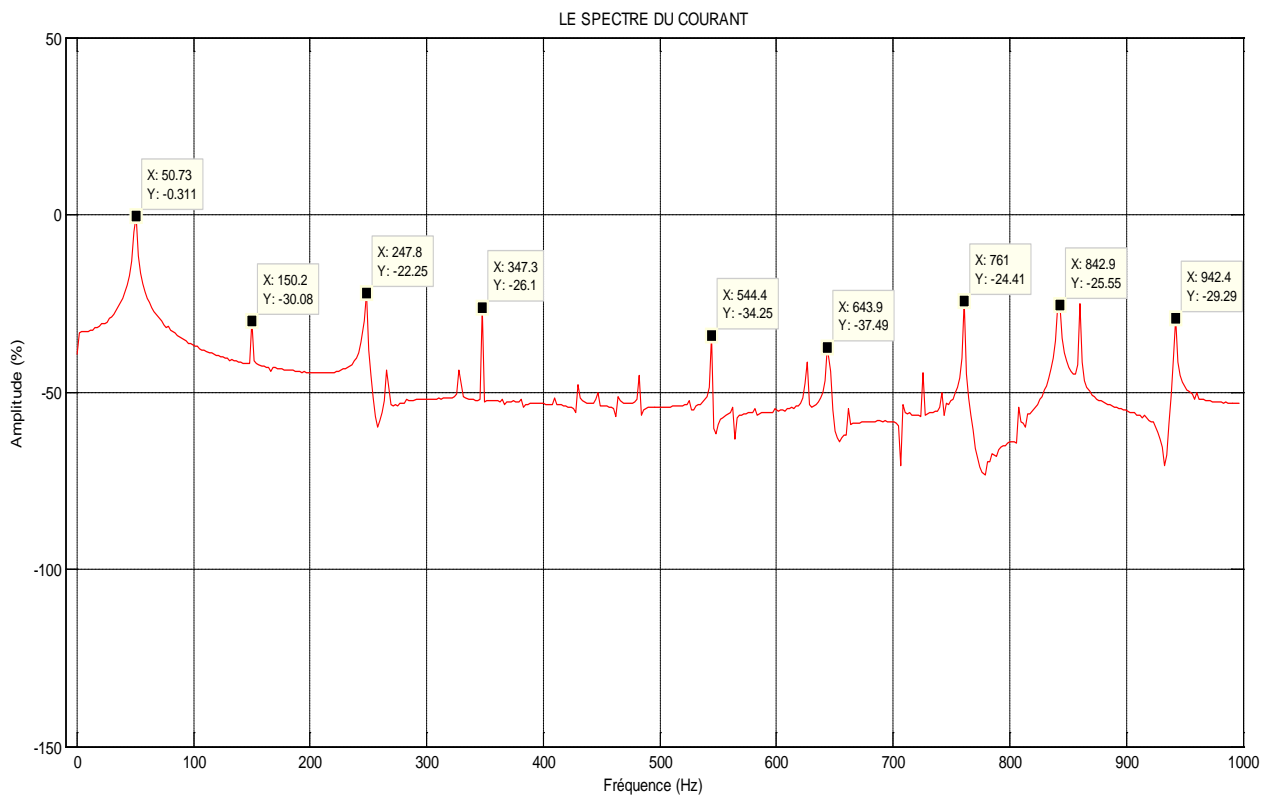


Figure 3.29. Les spectres du courant statorique en charge avec tension déséquilibré

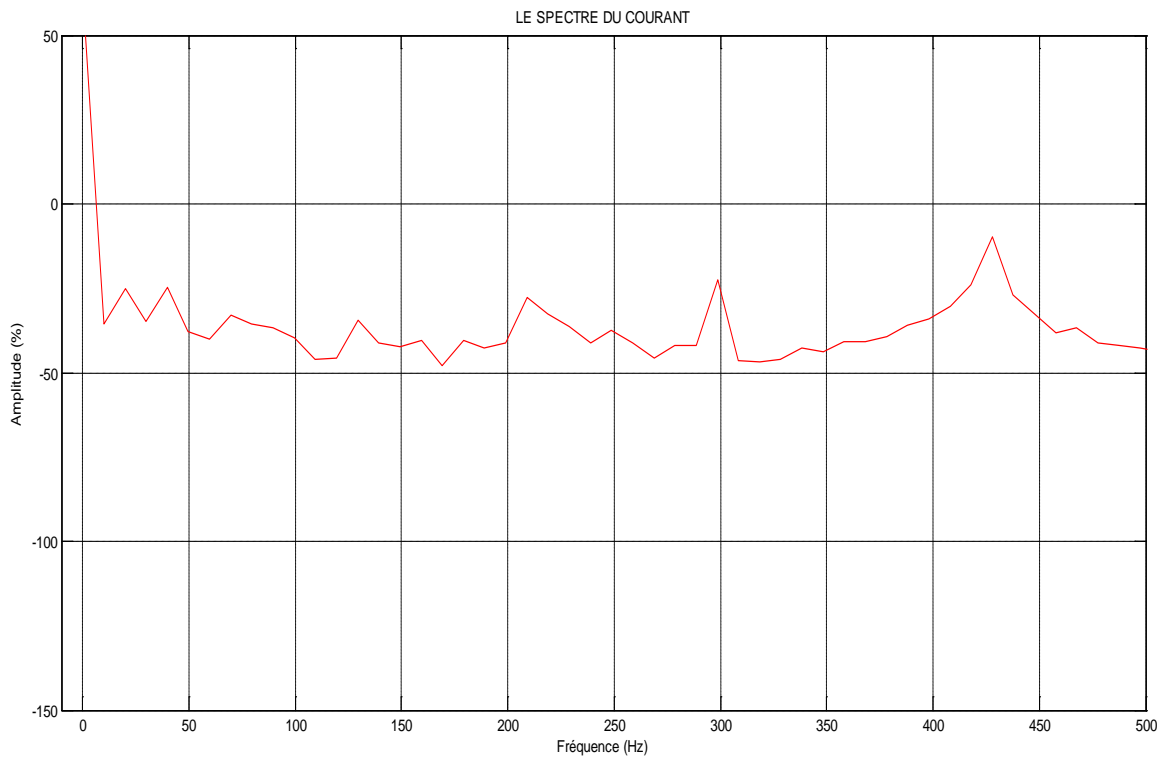


Figure 3.30. Le spectre de la vitesse en équilibrage

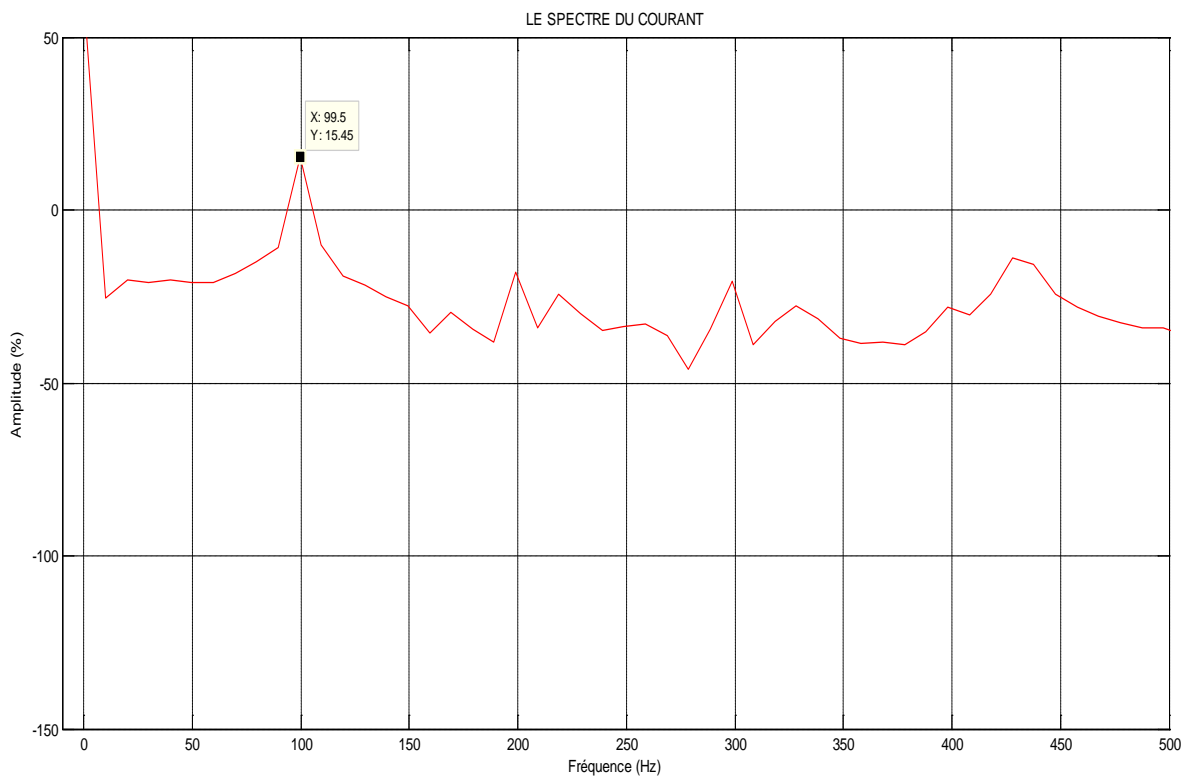


Figure 3.31. Le spectre de la vitesse en déséquilibre

3.10.5 Interprétation de l'analyse spectrale

Les deux figures 3.28 et 3.29 montrent les courbes des spectres du courant statorique lorsque le moteur fonctionne en charge avec une phase déséquilibré de 26.31 %

Nous concluons directement qu'il y'a une élévation très importante de l'amplitude du troisième harmonique de la saturation (150 Hz) est remarquée, un écart de 30 % entre l'amplitude obtenu du courant lorsque la machine est chargé (courant de phase). Les amplitudes des deux autres harmoniques suivent la même tendance

Le déséquilibre de réseau crée des perturbations au niveau du spectre de la vitesse entre les régimes sain et déséquilibré, tel que ya une augmentation au niveau du spectre de la fréquence (100Hz)

3.11 Conclusion

Ce chapitre a été réservé à l'élaboration du modèle des éléments finis dédié à la simulation de la MADA en deux régimes à vide et en charge (saine et en défaut) sous l'environnement du logiciel Flux 2D. Malgré que cette modélisation soit très couteuse en temps de calcul, elle reste très fidèle au comportement de la machine. Cette caractéristique est bien argumentée par les différents résultats obtenus, Ainsi que la grande partie de ce chapitre a été consacrée pour le contenu spectral du courant statorique à l'état sain et en déséquilibre. Et comme le réseau électrique a des perturbations, il est nécessaire de cerner l'impact de déséquilibre des tensions d'alimentation sur le contenu spectral du courant statorique. Enfin, les effets: la connexion de circuit, la charge, déséquilibre de tensions, constituerons l'essentiel de prochain chapitre qui fait saillants sur le fonctionnement de la machine en pratique pour accomplir un diagnostic plus concis et surtout plus fiable.

4.1 Introduction

Dans ce chapitre nous avons fait des expériences sur la MADA pour étudier les résultats des phénomènes et pour réaliser une étude comparative entre les résultats de l'expérience sur les éléments réels et les résultats de simulation. Actuellement il existe plusieurs outils qui nous ont aidés à étudier le fonctionnement de la MADA avec plusieurs essais pratique pour voir les impacts de régime déséquilibré sur le moteur et les spectres de courants statorique.

4.2 Campagnes d'Essais et Description

Notre travail a pour objectif d'établir des éléments de diagnostic de défauts électriques de déséquilibre de tension d'une phase, de mauvais contact ou des erreurs de branchement. Le choix des techniques et des défauts ciblés a été établi suite à la présence de ces défauts dans les applications industrielles.

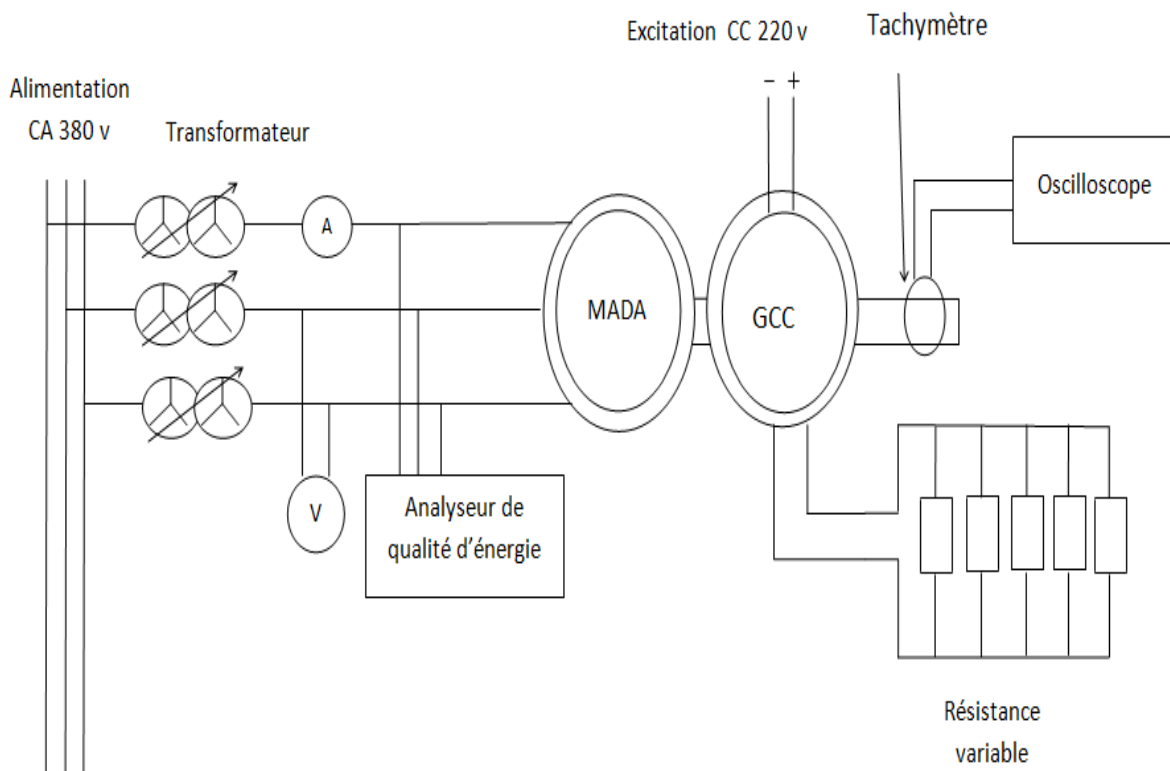


Figure 4.1. Configuration du banc expérimental

4.3 Les étapes de réalisation de la technique du diagnostic

- Réalisation d'un montage de démarrage du moteur avec un couplage étoile.
- Utilise 3 transformateurs pour modifier la tension de l'alimentation et crée le déséquilibre dans une phase.
- Faire des essais en régime sain et en déséquilibre (en charge et à vide).
- Prend des signaux depuis l'analyseur de qualité d'énergie.
- Effectuer une comparaison entre les signaux dans les deux cas sain et défaillant et déduire une relation entre ces derniers pour identifier directement le type de défaut par une simple lecture des signatures des courants statoriques.

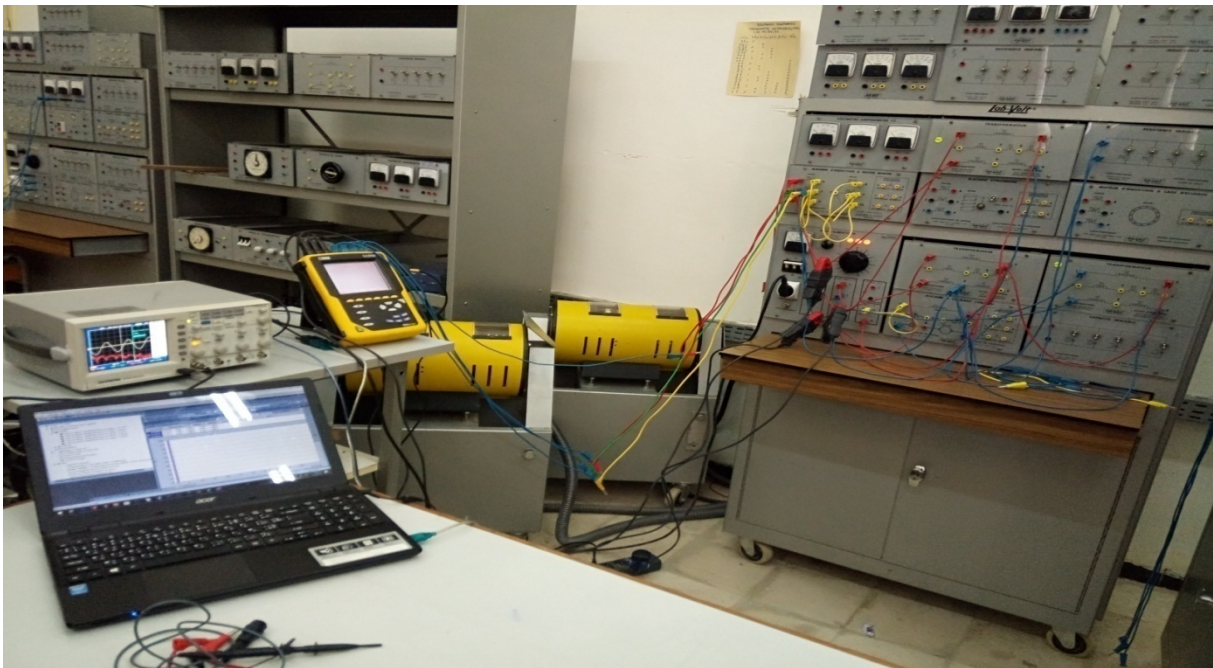


Figure 4.2. Banc d'Essai

4.4 Description de Matériel

4.4.1 L'alimentation

L'alimentation électrique est l'ensemble des équipements électriques qui assure le transfert du courant électrique d'un réseau électrique pour le fournir, sous les paramètres appropriés (puissance, tension...), dans notre travail nous utiliser un bloc d'alimentation qui compose de 2 source de tension alternative et deux continus.



Figure 4.3. Représente bloc d'alimentation

4.4.2 Analyseur de qualité d'énergie

Un analyseur de qualité d'énergie est un instrument de mesure destiné à afficher les différentes fréquences contenues dans un signal ainsi que leurs amplitudes respectives. Les signaux peuvent être de natures diverses : électrique, optique, sonore, radioélectrique.



Figure 4.4. Représente l'analyseur de qualité d'énergie

4.4.3 Oscilloscope

Un oscilloscope est un instrument de mesure destiné à visualiser un signal électrique, le plus souvent variable au cours du temps. Il est utilisé par de nombreux scientifiques afin de visualiser soit des tensions électriques, soit diverses autres grandeurs physiques préalablement transformées en tension au moyen d'un convertisseur adapté ou de capteurs. La courbe de rendu d'un oscilloscope est appelée oscillogramme.

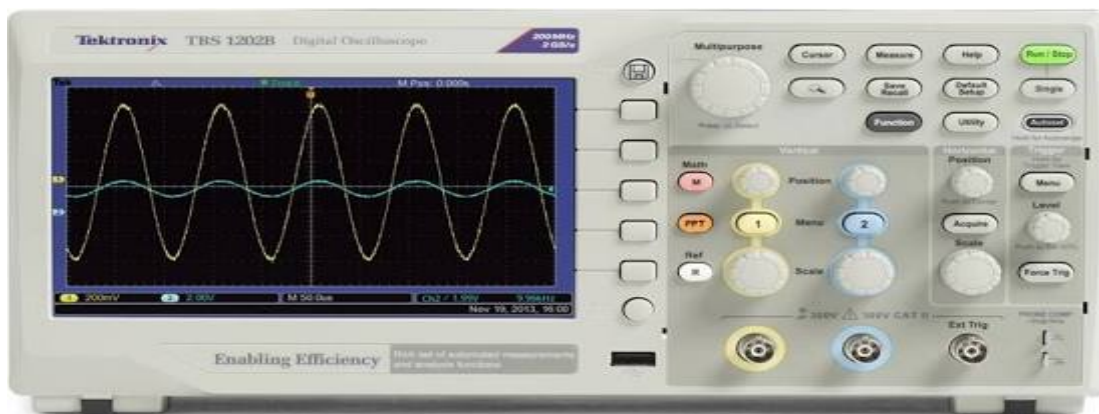


Figure 4.5. Représente oscilloscope numérique

4.4.5 Transformateur

Un transformateur électrique est une machine électrique permettant de modifier les valeurs de tension et d'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative, en un système de tension et de courant de valeurs différentes, mais de même fréquence et de même forme. Il effectue cette transformation avec un excellent rendement.

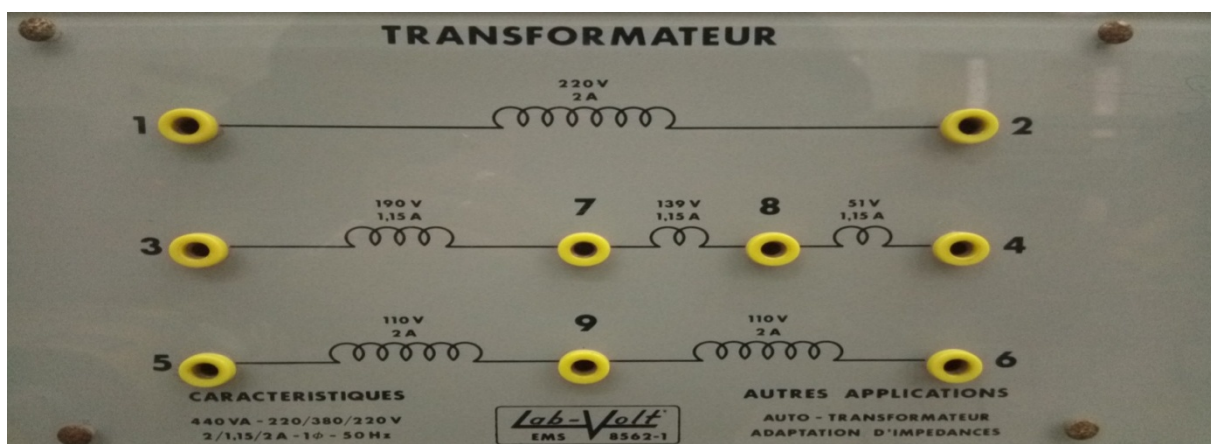


Figure 4.6. Représente les enroulements primaire et secondaire de transformateur

4.4.6 La résistance variable

C'est une résistance qui donne une valeur est variable .En fait, toutes les résistances sont variables, mais seules celles ayant une plage de variation significative sont désignées comme telles. De nombreux facteurs peuvent induire une variation de R en fonction de sa constitution.

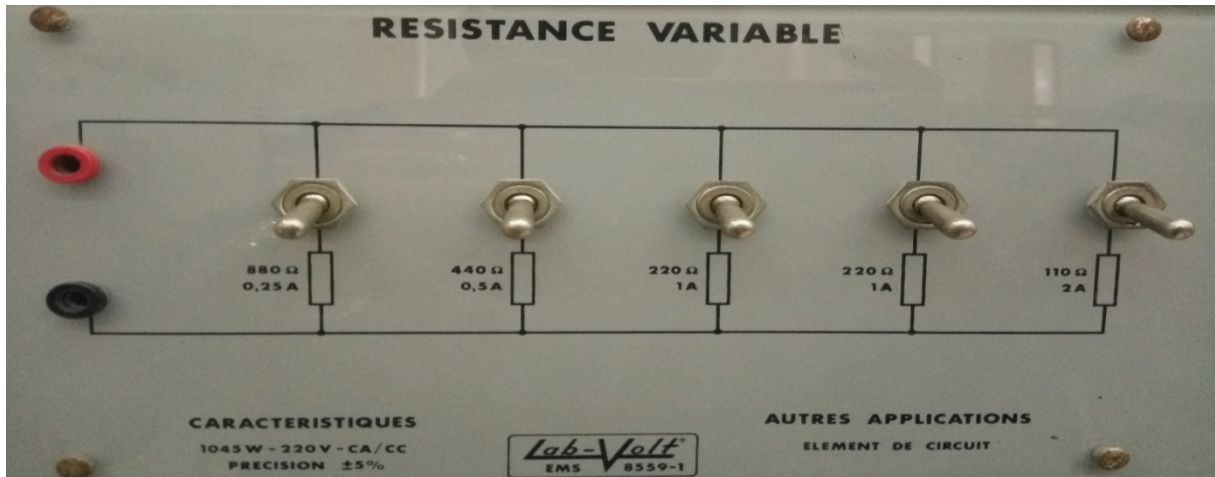


Figure 4.7.Représente la résistance variable

4.4.7 Machine à courant continu

Une machine à courant continu est une machine électrique. Il s'agit d'un convertisseur électromagnétique permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant continu et un dispositif mécanique, selon la source d'énergie.

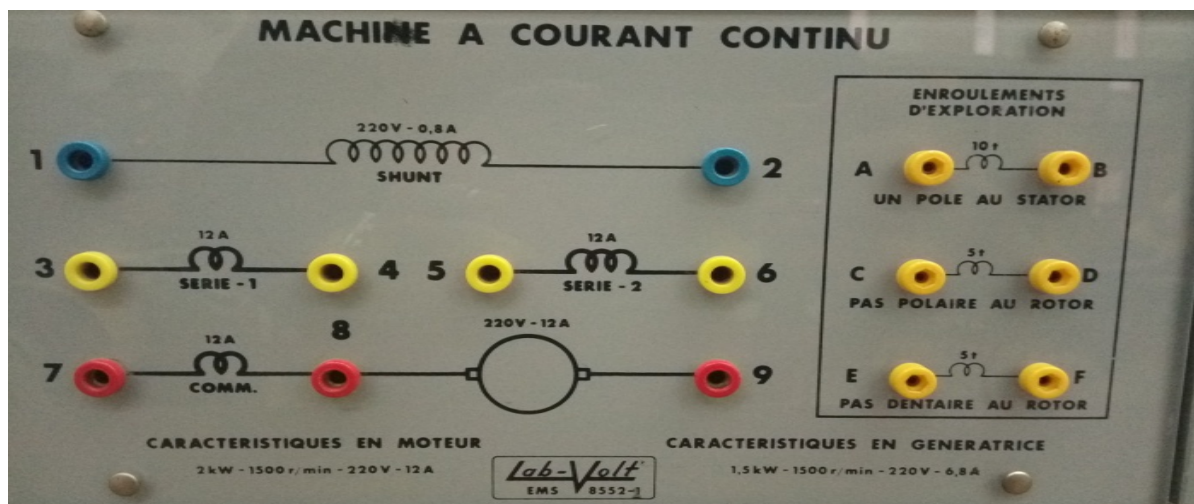


Figure 4.8.Représente les borne d'alimentation de la MCC

4.4.8 Machine à rotor bobiné

Comme la machine à rotor bobiné est définie en premier chapitre on l'utilise pour étudier le fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation le cas où la deuxième alimentation est nulle.

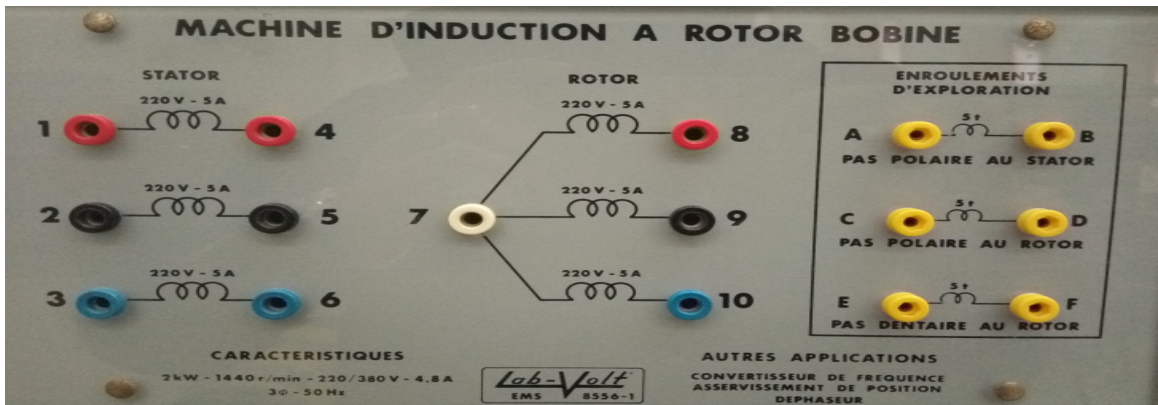


Figure 4.9. Représente les borne d'alimentation de la MRB

4.5 Résultat expérimentale de fonctionnement à vide

Nous avons étudié le fonctionnement de la MADA dans le cas où les bobines rotorique sont court-circuitées (annuler la deuxième alimentation de rotor) en régime sain et en défaut de déséquilibre "tension" et on a obtenu les résultats suivant grâce à l'analyseur de qualité d'énergie, nous avons appliqué une tension de 192v.

4.5.1 Tension équilibre

On a alimenté notre machine par trois tension ($V_1 = 192,6 \text{ v}$; $V_2 = 193,8 \text{ v}$; $V_3 = 191,8 \text{ v}$)

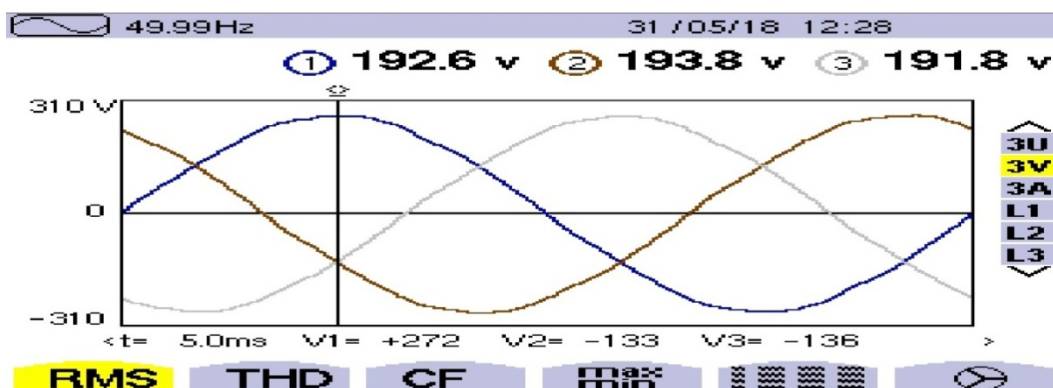


Figure 4.10. Représentation des tensions statorique équilibré.

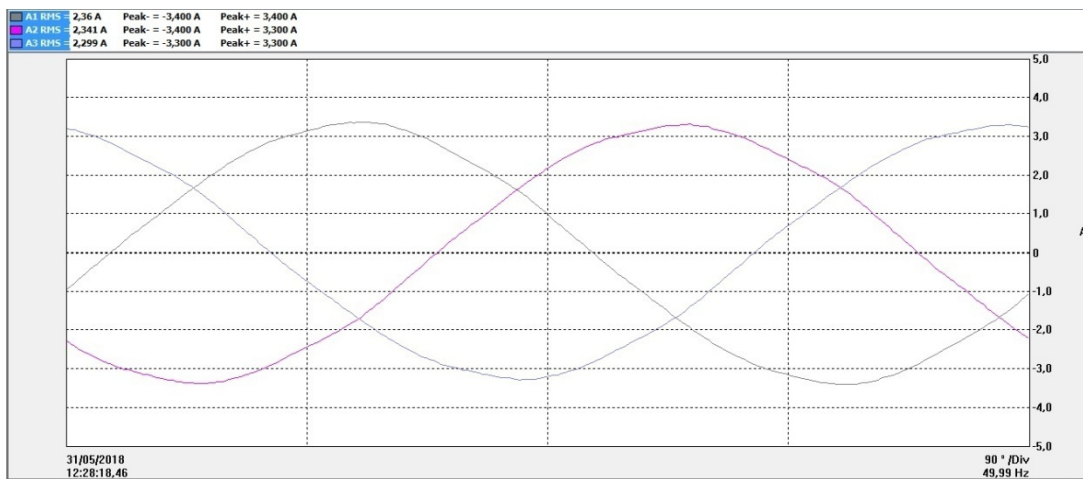


Figure 4.11.Représentation des courants statorique équilibré.

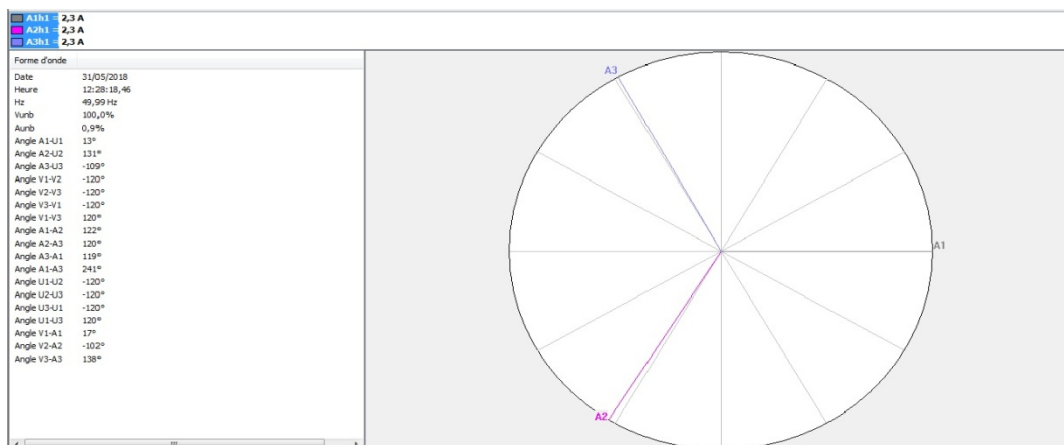


Figure 4.12.Représentation l'équilibrage des courants statorique équilibré.

4.5.2 Tension déséquilibré

Pour étudier le comportement de la MADA avec un défaut de déséquilibre de tension dans la troisième phase, on applique une tension de 110 v.

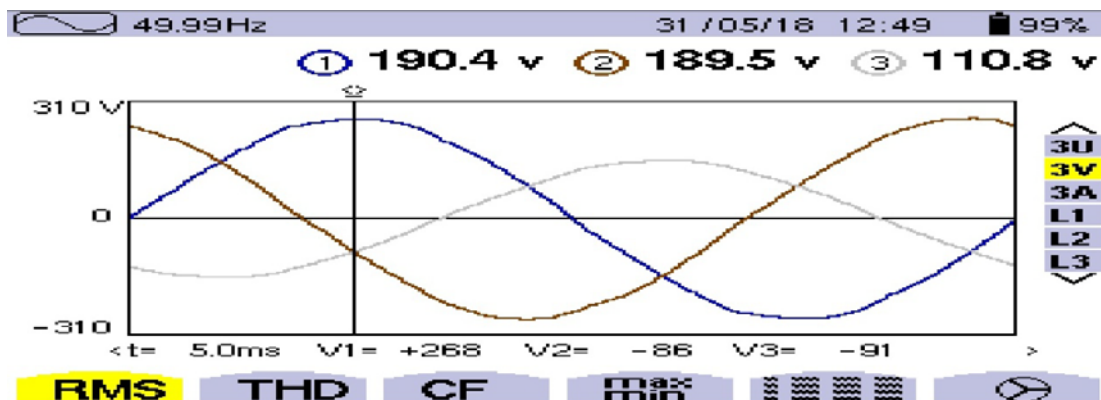


Figure 4.13.Représentation des tensions statorique déséquilibré.

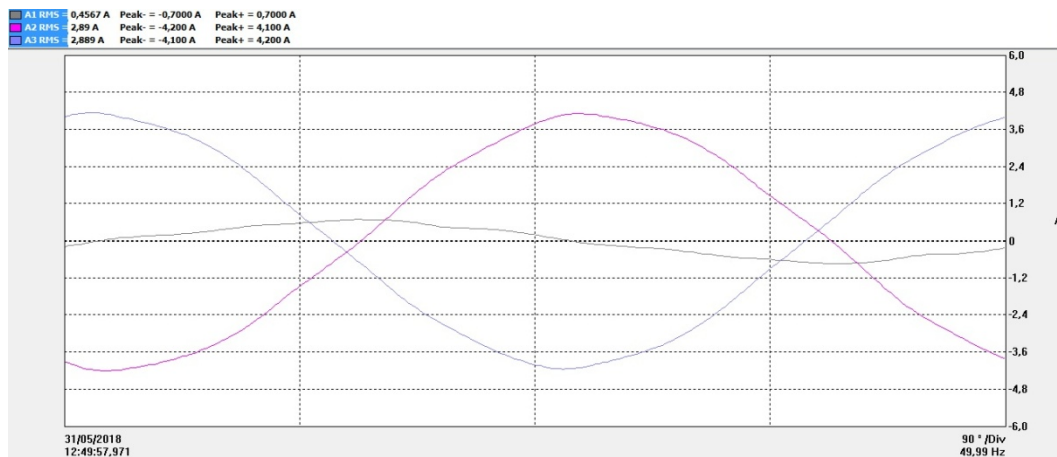


Figure 4.14. Représentation des courants statorique déséquilibré.

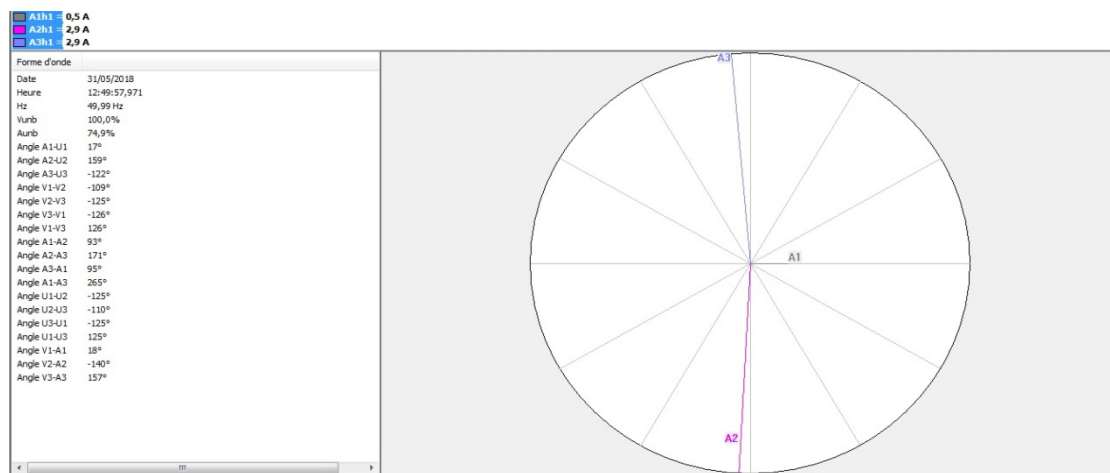


Figure 4.15. Représentation des courants statorique déséquilibré.

4.5.3 Interprétation des résultats

Dans le régime sain les courants statorique sont égaux (2,3 A) et on remarque que le réseau n'est pas parfait et ya des petites chute de tension.

Par contre au régime déséquilibré on constate une grande variation entre les valeurs maximales des trois courant statorique et sur le déphasage (A1-A2-93° A2-A3-171° A3-A1-95°) où nous remarquons une baisse significative au niveau de l'intensité du courant dans la 1ére phase (0,5 A) qui à le déséquilibre et le contraire pour les deux autres phases (2,9 A) cette augmentation c'est pour compenser l'absence du courant dans la phase 1.

4.5.4 Résultat de l'analyse spectrale par FFT

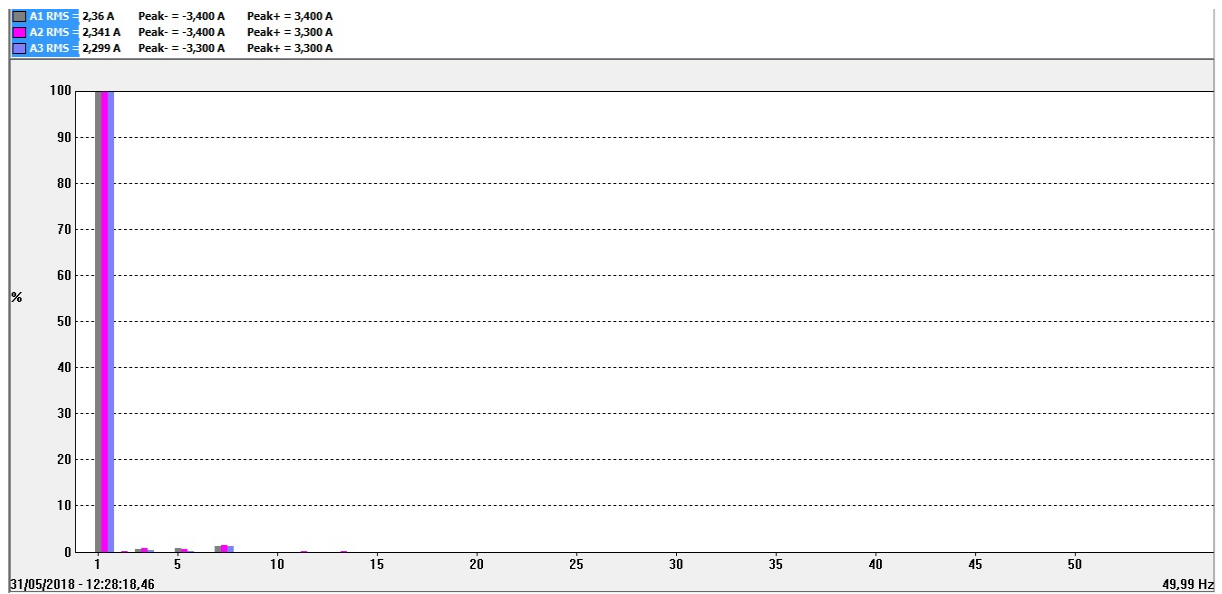


Figure 4.16. Les spectres du courant statorique à vide équilibré

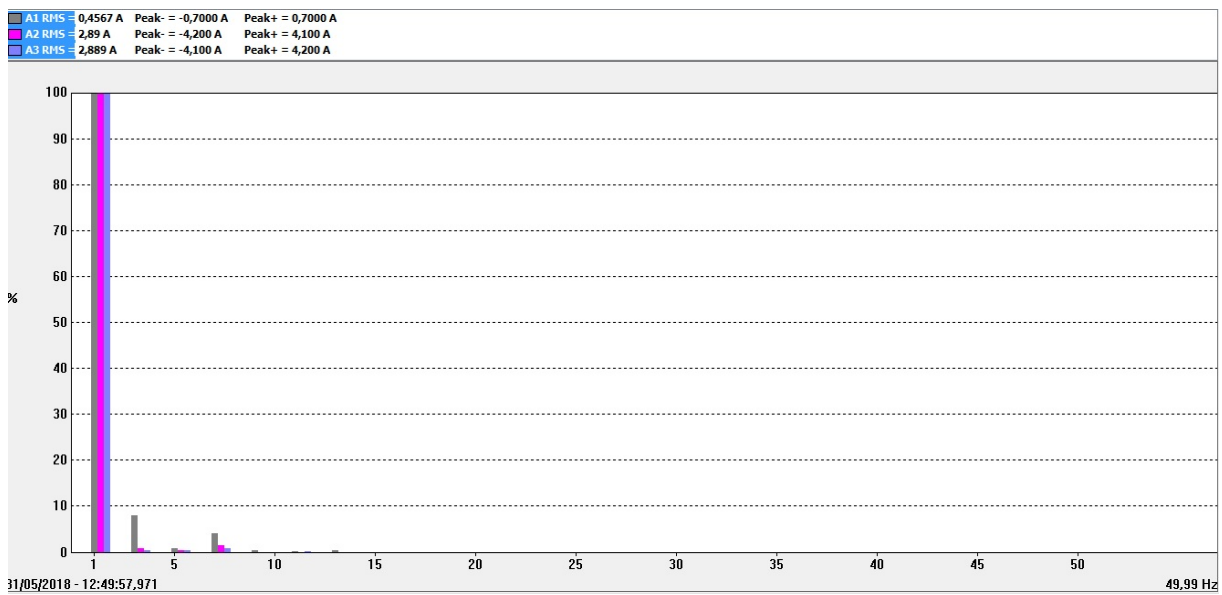


Figure 4.17. Les spectres du courant statorique à vide déséquilibré

4.5.5 Interprétation de l'analyse spectrale

La représentation des spectres des courants statorique dans le cas de la machine sain représente une petite augmentation des harmoniques à cause de la perturbation dans l'alimentation (réseau n'est pas parfait).

On déséquilibre on remarque que les spectres du courant statorique représente une augmentation de la (3ème et 7ème) harmonique au niveau de la première phase qui contient le déséquilibre se qui a entraîné un bruit venant du moteur.

4.6 Résultat expérimentale de fonctionnement en charge

On a associé la MADA avec une génératrice (courant continu) qui alimente une charge de 125Ω pour remplacé la charge mécanique et on s'intéresse aux graphes du courant.

4.6.1 Tension équilibré

On a alimenté la machine par trois tensions équilibrées ($V1=158 \text{ v}$; $V2= 158 \text{ v}$; $V3= 158 \text{ v}$)

Date	Heure	Voie	unb%	THD	CF	Pst	KF	DC	DF	RMS
04/06/2018	11:56:06,519	V1	100,0%	1,1%	1,44	1,8		-0,2	1,0	158,6
		V2		1,1%	1,42	0,56		-0,3	1,1	158,7
		V3		1,0%	1,43	0,55		-0,3	0,9	158,1
		A1	100,0%	0,9%	1,44		1		0,9	5,3
		A2		0,8%	1,43		1		0,8	5,2
		A3		0,6%	1,43		1		0,6	5,3
		U1		1,1%	1,46			0	1,1	274,8
		U2		1,1%	1,45			0	1,1	274,4
		U3		1,0%	1,46			0	1,0	274,1

Tableau 4.1. Les tensions et les courants dans les trois lignes.

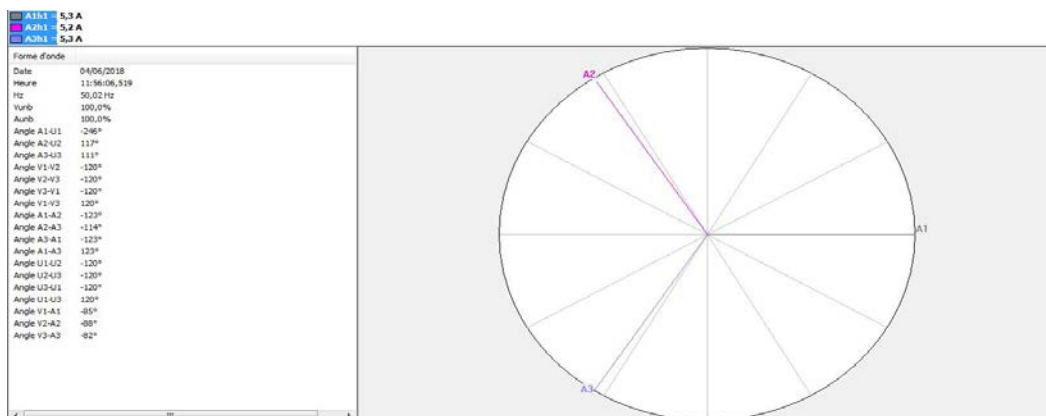


Figure 4.18. Représentation l'équilibrage des courants statorique

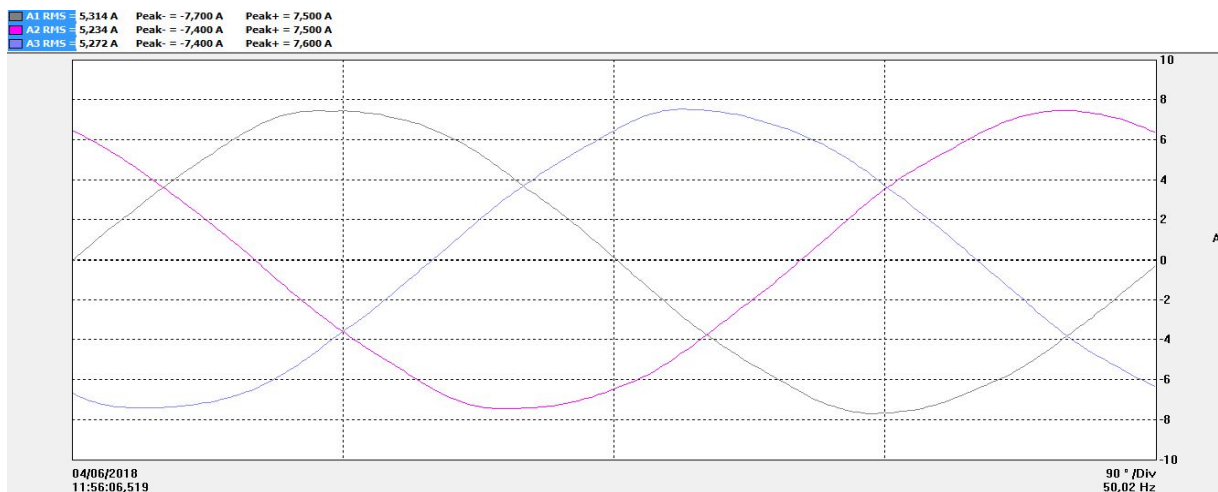


Figure 4.19. Représentation des courants statorique

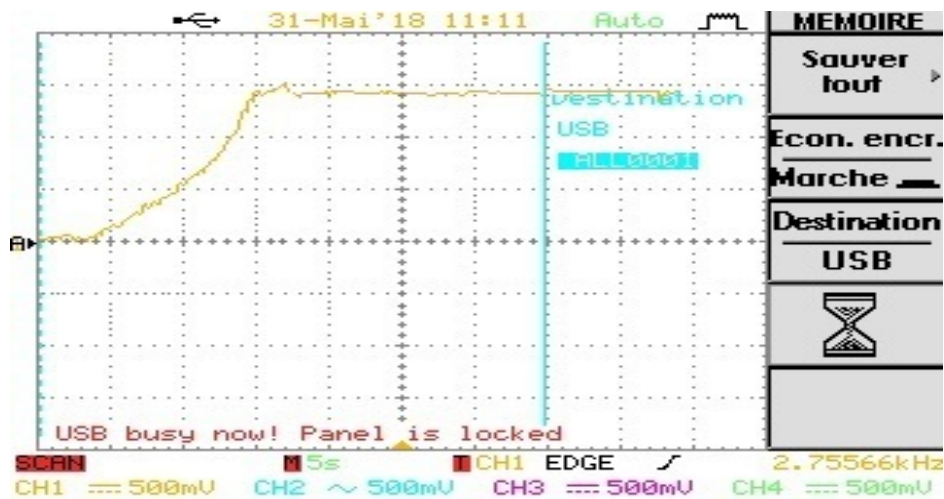


Figure 4.20. La vitesse en fonction de temps

4.6.2 Tension déséquilibrée

Dans ce cas on a alimenté la machine par trois tensions et on a créé un déséquilibre dans la première phase $V_1=118$ v.

Date	Heure	Voie	unb%	THD	CF	Pst	KF	DC	DF	RMS
04/06/2018	12:28:47,757	V1	100,0%	1,4%	1,42	0		-0,2	1,4	118,2
		V2		1,0%	1,42	0		-0,2	0,9	159,8
		V3		1,3%	1,4	0		-0,3	1,2	148,9
		A1	100,0%	1,2%	1,41		1		1,2	5,1
		A2		1,1%	1,43		1		1,1	5,3
		A3		2,8%	1,46		1,01		2,8	2,3
		U1		1,2%	1,42			0	1,2	232,8
		U2		1,1%	1,44			0	1,1	279,5
		U3		1,4%	1,45			0	1,4	228,6

Tableau 4.2. Les tensions et les courants dans les trois lignes.

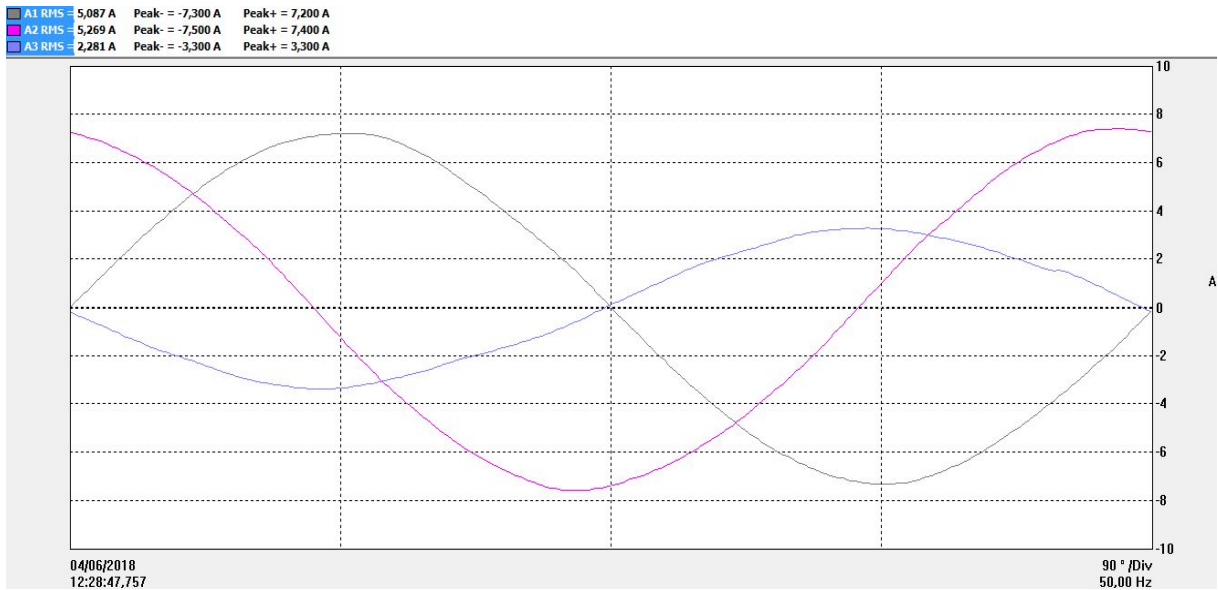


Figure 4.21.Représentation des courants statorique

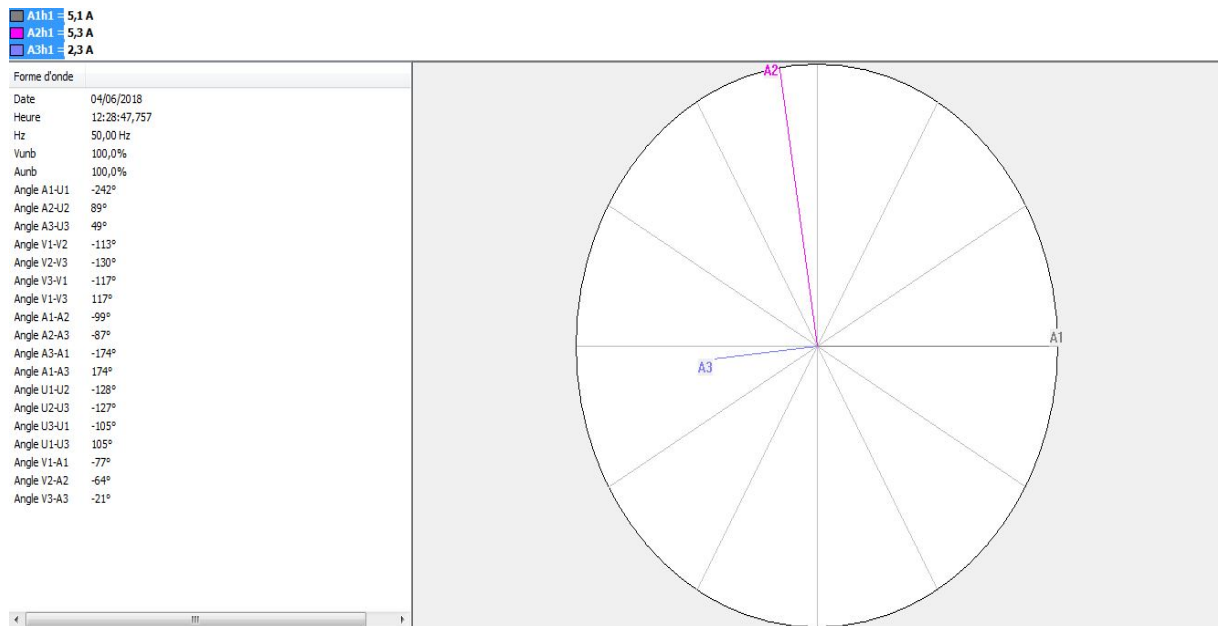


Figure 4.22.Représentation l'équilibrage des courants statorique

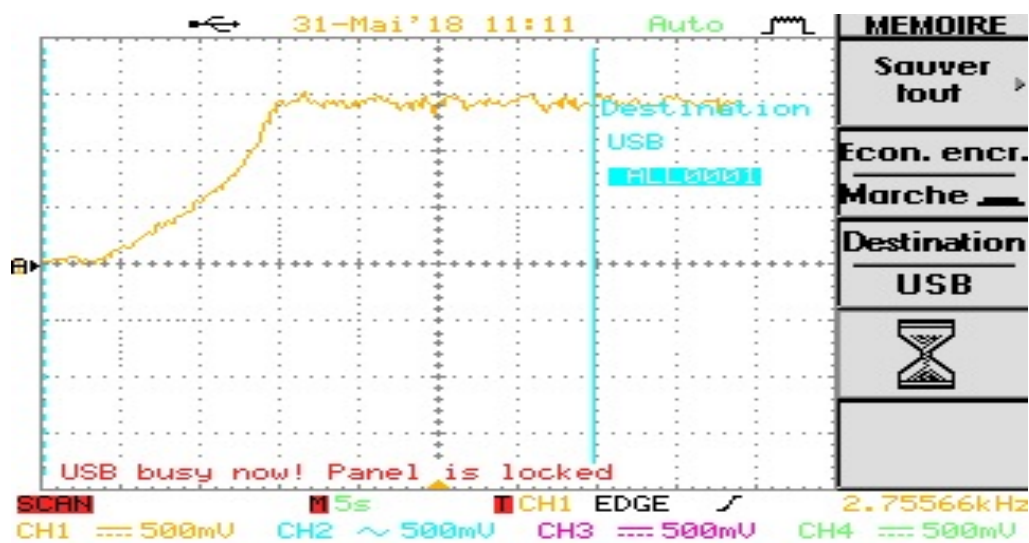


Figure 4.23. La vitesse en fonction de temps

4.6.3 Interprétation des résultats

Lorsqu'on applique une charge de 125Ω sur le moteur on remarque :

Dans le régime sain la machine absorbe des courants statorique équilibré depuis les trois phases plus de celle à vide (5,3 A).

A l'aide de tachymètre on peut voir la courbe de la vitesse qui oscillé légèrement en régime transitoire avant de stabiliser au voisinage de la vitesse de synchronisme

Par contre au régime déséquilibré on n'as appliqué la même charge sur la machine pour éviter le risque de bousier la machine.

Nous observons une baisse de l'intensité courant dans la première phase qui contient le déséquilibre (2,3 A) par rapport les deux autres phases (5,2 A).

On constat aussi que le déphasage entre les courants diminue ($A1-A2-99^\circ$ $A2-A3-87^\circ$ $A3-A1-174^\circ$)

Ce changement affecté négativement à la vitesse par des oscillations au niveau de régime permanent (perturbation de la vitesse)

Quand la charge augment le bruit augment aussi se qui pose un risque pour le moteur.

4.6.4 Résultat de l'analyse spectrale par FFT

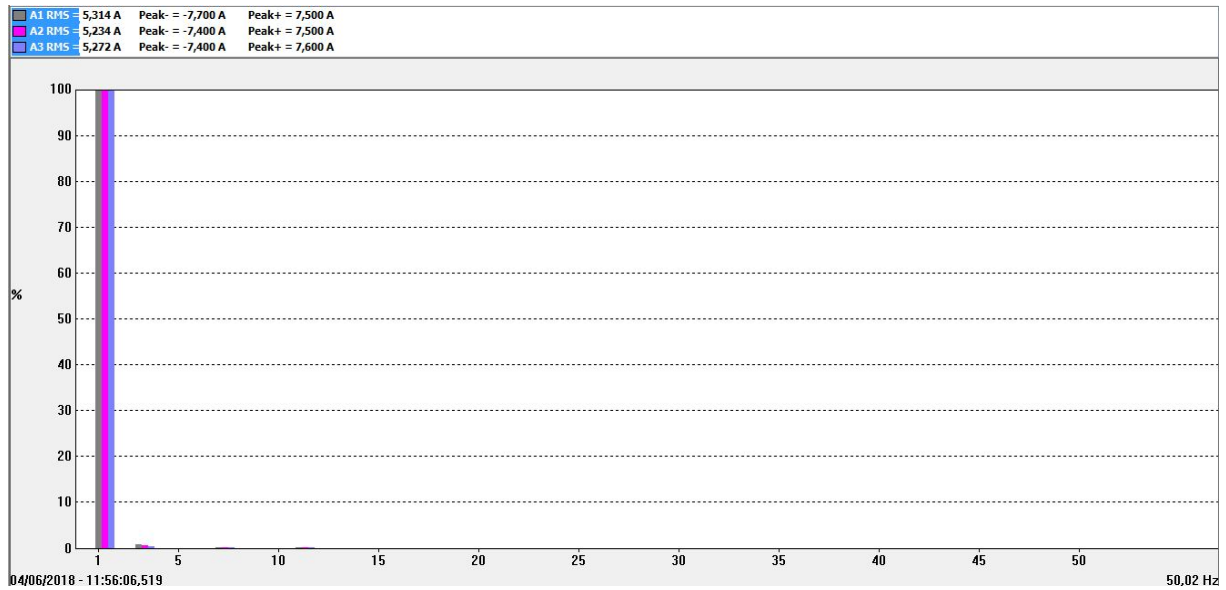


Figure 4.24. Les spectres du courant statorique en charge avec tension équilibré

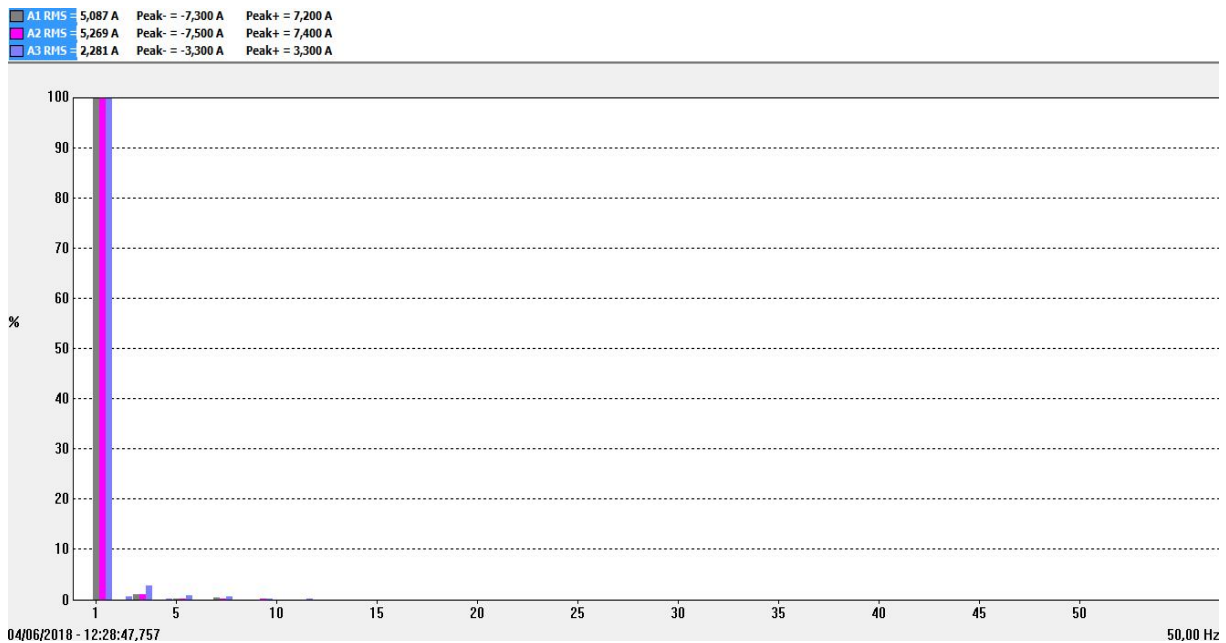


Figure 4.25. Les spectres du courant statorique en charge avec tension déséquilibré

4.6.5 Interprétation de l'analyse spectrale

Nous observons l'apparition des harmoniques impairs avec un accroissement de leurs amplitudes respectives.

On remarque que tous les harmoniques amplifient par rapport au régime sain, cette amplification perturbe la machine à cause de laquelle on écoute une vibration de moteur.

Il y a une grande différence entre le régime sain et déséquilibré malgré que l'harmonique 3 existe à vide et en charge.

Quand la charge augmente les harmoniques représentent un pourcentage plus ou moins parce que l'analyseur de qualité d'énergie nous donne le pourcentage des harmoniques par rapport au courant statorique.

4.7 Synthèse des techniques du diagnostic utilisées

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

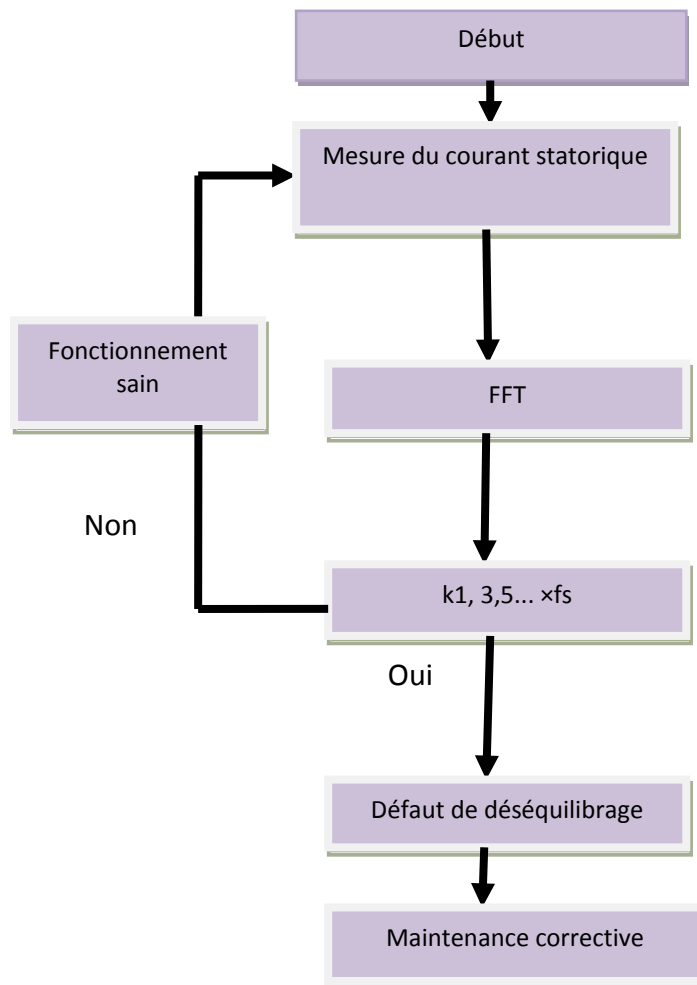


Figure 4.26. Synthèse du diagnostic étudié

4.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté les résultats expérimentaux et leurs interprétations sont indiquées. Ils illustrent la possibilité et la sensibilité de détection de défauts multiples moyennant le captage du déséquilibre de tension dans le stator, ce modèle d'étude pratique nous a permis d'obtenir le fonctionnement de la machine qui nous a aidé à visualiser les courants circulant dans la partie défaillante du bobinage.

Cette étude nous a permis d'affirmer l'importance de détecter le défaut pour limiter les risques de la destruction de la machine.

Le diagnostic des machines électriques s'est fortement développé dans le monde industriel car la volonté d'obtenir une chaîne de production de plus en plus sûre devient, pour certaines applications, indispensable. Les chaînes de production doivent être dotées des systèmes de protection fiables car une défaillance, même la plus faible, peut mener à un dommage matériel. C'est pour éviter ces problèmes que la recherche, sur le plan mondial, s'emploie depuis plusieurs dizaines d'années à élaborer des méthodes de diagnostic. Celles-ci ont pour premier objectif de prévenir les utilisateurs d'un risque possible pouvant apparaître en un point particulier du système.

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones à double alimentation. Nous avons focalisé l'étude de diagnostic sur les défauts électriques très critiques qui peuvent détériorer le bobinage du moteur dus aux mauvais branchements et aux problèmes de l'alimentation électrique à savoir tels que le mauvais contact d'une phase, l'erreur de branchement des phases du moteur, l'absence d'une phase,....

Et pour faire un diagnostic globale et voir le fonctionnement de moteur on a devisé le travail en deux partie, la première pour voir le comportement de moteur par simulation à l'aide de logiciel flux 2D et la deuxième partie basé sur l'étude expérimentale au laboratoire.

La modélisation de la machine asynchrone a double alimentation par la méthode des éléments finis réalisée est dédiée à la simulation de la machine saine et avec défaut. Malgré que cette modélisation soit très onéreuse en temps de calcul, elle montre une grande fidélité au comportement de la machine. Cette caractéristique est bien argumentée par les différents résultats obtenus en régime sein et défectueuse dans la troisième chapitre.

L'étude par éléments finis a permis de mettre en évidence les variations de vitesse dues aux fluctuations de couple d'une machine par le défaut de déséquilibre de tension statorique, et de déterminer les répartitions des lignes d'équiflux dans le circuit magnétique de la machine asynchrone.

Dans cette étude, nous avons réalisé une simulation numérique pour voir l'impact des défauts électriques préconisés sur les autres grandeurs électromécaniques de la machine à

savoir le couple, la vitesse, et les courants statoriques. Afin de représenter expérimentalement le comportement de la machine lors d'un fonctionnement normal (sain) et anormal (défaillante), nous avons simulé le moteur asynchrone à double alimentation face à des défauts statoriques. Ensuite, Nous avons effectué l'analyse spectrale du courant statorique, par la transformée de Fourier rapide (FFT) qui nous a offert la possibilité de détecter les défauts statoriques.

L'analyse spectrale du courant statorique a été focalisée sur la gamme des très basses fréquences, les composantes traditionnelles ($f_{dés} = k.fs$) autour du fondamental ont été détecté pour un nombre différents de déséquilibre, et pour différentes charges.

Les défauts électriques que nous avons essayé d'étudier expérimentalement au laboratoire sont très dangereux aussi bien pour le moteur que le personnel. En l'absence d'une protection électromagnétique rigoureuse.

Finalement, on peut dire que les résultats obtenu depuis les deux partie sont presque les même sauf que en simulation on peut visualiser les signaux (courant rotorique, couple....) de moteur en plusieurs cas sans le risque de détruire la machine, par contre en expérimental on peut voir le fonctionnement réel de la machine (bruit, vibration....).

Paramètre géométrique de la machine

- **Statorique**

Epaisseur d'entrefer	0.44 mm
Diamètre interne statorique	158.80 mm
Diamètre externe statorique	247.65 mm
Ouverture d'encoche	2.54 mm
Largeur dents	5.334mm
Largeur d'encoche (sous les becs)	5.38 mm
Largeur d'encoche (au fond)	8.28 mm
Ouverture d'encoche	2.54 mm

- **Rotorique**

Diamètre interne rotorique	50.8 mm
Diamètre interne externe	157.87 mm
Hauteur d'encoche rotorique	23.75 mm
Largeur d'encoche (sous les becs)	7.163 mm
Largeur d'encoche (au fond)	3.556 mm
Ouverture d'encoche	2.54 mm
Largeur dents	6.35 mm

Paramètres électriques

- **Statorique**

Resistance statorique les tête d'bobinage	R1 R2 R3	0.001 OHM
Resistance statorique de bobinage	B1 B2 B3 B4 B5 B6 B7 B8 B9 B10 B11 B12	1.35796 OHM
Inductance statorique	L 1 L2 L3	0.00956 H

- **Rotorique**

Resistance rotorique les tête d'bobinage	R4 R5 R6	0.001
Resistance rotorique de bobinage	B13 B 14 B15 B16 B17 B18 B19 B20 B21 B22 B23 B24 B25	1.15243
Inductance rotorique	L4 L5 L6	0.00448

Région surfacique

- **Stator**

Régine	Type de région	Matériau de région	Composant électrique de région	Nombre de spire du conducteur	Ensemble mécanique
SSA	Conducteur bobine	Cuivre	B1	112	Stator

SSA1	Conducteur bobine	Cuivre	B2	112	Stator
SSA2	Conducteur bobine	Cuivre	B3	112	Stator
SSA3	Conducteur bobine	Cuivre	B4	112	Stator
SSB	Conducteur bobine	Cuivre	B5	112	Stator
SSB1	Conducteur bobine	Cuivre	B6	112	Stator
SSB2	Conducteur bobine	Cuivre	B7	112	Stator
SSB3	Conducteur bobine	Cuivre	B8	112	Stator
SSC	Conducteur bobine	Cuivre	B9	112	Stator
SSC1	Conducteur bobine	Cuivre	B10	112	Stator
SSC2	Conducteur bobine	Cuivre	B11	112	Stator
SSC3	Conducteur bobine	Cuivre	B12	112	Stator

STATOR	Région magnétique no conductrice	Fer			Stator
--------	--	-----	--	--	--------

- **Rotor**

SRA	Conducteur bobine	Cuivre	B13	100	Rotor
SRA1	Conducteur bobine	Cuivre	B14	100	Rotor
SRA2	Conducteur bobine	Cuivre	B15	100	Rotor
SRA3	Conducteur bobine	Cuivre	B16	100	Rotor
SRB	Conducteur bobine	Cuivre	B17	100	Rotor
SRB1	Conducteur bobine	Cuivre	B18	100	Rotor
SRB2	Conducteur bobine	Cuivre	B19	100	Rotor
SRB3	Conducteur bobine	Cuivre	B20	100	Rotor
SRC	Conducteur bobine	Cuivre	B21	100	Rotor
SRC1	Conducteur bobine	Cuivre	B22	100	Rotor
SRC2	Conducteur bobine	Cuivre	B23	100	Rotor

SRC3	Conducteur bobine	Cuivre	B24	100	Rotor
Rotor	Région magnétique non conductrice	FER			Rotor

- [1] Hamadou Adil .Nessissen Abdelkader «Modélisation numérique d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil» thèse de master en génie électrique, Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana, 2015.
- [2] Djedia Djedid. Hammi Hichem «Etude et modélisation du moteur asynchrone à double cage» mémoire master, université Kasdi Merbah Ouargla. 2016/ 2017.
- [3] Fenni .Atmane «Commande Non Linéaire Par Des Régulateurs En Mode Glissant D'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) ». Magister en électrotechnique option: énergies renouvelables, Université Mohamed Khider Biskra, 2013.
- [4]B. Hopfenspeger et D.J.Atkinson, « Doubly-fed machines: classification and comparison», European Conference on Power. Electronics And Applications (EPE), Gras, 2001.
- [5] Pierre DZIWNIEL, «Etude des structures électromagnétiques présentant des directions d'invariance géométrique : application a la machine asynchrone a encoches inclinées» Thèse de doctorat en génie Electrique, Université des sciences et technologies de Lille, 1998.
- [6] Bennani. Hakim «machine asynchrone a double alimentation Les lois de commande en régime permanent», thèse de doctorat de l'Université Laval, 2011.
- [7] Lebaroud Abdesselam «Modélisation et techniques orientées vers le diagnostic de la machine asynchrone associée à des sources variables», Thèse de doctorat en Génie Electrique, l'Université de Constantine, 2006.
- [8] B.VASEGHI « Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre-spires Modélisation – Réduction du courant de défaut», thèse de doctorat de l'I.N.P.L, 2009
- [9] CHERIF Hakima, «Détection des défauts statoriques et rotoriques dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et Ondelettes» thèse de Magister, Université Mohamed Khider Biskra.2014
- [10] Bulletin sur la qualité de l'électricité, Le déséquilibre de tension et de courant, Numéro 014G1546F, Hydro Québec.
- [11] BELATEL mimi « Etude des machines électriques par CAO » Thèse de doctorat en Génie Electrique, Université Mentouri Constantine, 2009.

- [12] Chouaib Labiod, «Modélisation des phénomènes électromagnétiques dans une machine à reluctance variable », thèse de Magister université de Biskra, 2014.
- [13] Romain Garnier. «Contribution à la résolution des équations de Maxwell dans les structures périodiques par la méthode des éléments finis». Electromagnétisme. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2013.
- [14] Mohamed Rachek, « Modélisation par méthode numérique de systèmes électromagnétiques en mouvement de structures tridimensionnelles : application au couplage magnétique-mécanique et au contrôle non destructif par courant de Foucault », thèse de doctorat, UMMTO, 2007.
- [15] AINOUCHE Toufik, BOURAHLA Mohamed amine, «Calcul par éléments finis et réalisation expérimentale d'une machine asynchrone à cage double étoile», thèse de master en électrotechnique Industrielle, Université USTHB, 2010.
- [16] HACHELAF Redouane, «Etude de l'influence des défauts du bobinage sur les caractéristiques électromagnétiques de la MASDE», thèse de Magister a école militaire polytechnique,2011.
- [17] FLUX 2D[®], version 7.60, "Notice d'utilisation générale, volume 4: Equations, sous - programmes utilisateurs, géométrie et maillage avec PREFLU, axiperiodique", Cédrat, 2001.