



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Machines Electriques

Réf. :

Présenté et soutenu par :
Housseem Eddine MIMOUNI

Le : dimanche 7 juillet 2019

Modélisation des phénomènes électromagnétiques et
mécaniques dans une machine asynchrone à cage par
logiciel COMSOL-Multiphysics

Jury :

Mr.	Mohamed REZIG	MCB	Université de Biskra	Président
Mr.	Lotfi ALLOUI	Prof	Université de Biskra	Examineur
Mr.	Mohamed Lotfi KHENE	MCA	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2018 – 2019

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



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Machines Electriques

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

**Modélisation des phénomènes électromagnétiques et mécanique dans
une machine asynchrone à cage par logiciel COMSOL -Multiphysics**

Présenté par :

Housseem Eddine MIMOUNI

Avis favorable de l'encadreur :

Mohamed Lotfi KHENE

Avis favorable du Président du Jury

Mohamed REZIG

Cachet et signature

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



Université Mohamed Khider Biskra

**Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique**

Filière : Electrotechnique

Option : Machines Electriques

Thème :

**Modélisation des phénomènes électromagnétiques et mécaniques dans
une machine asynchrone à cage par logiciel COMSOL -Multiphysics**

Proposé par : Housseem Eddine MIMOUNI

Dirigé par : Mohamed Lotfi KHENE

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail en signe de gratitude et de respect à ma chère mère Souad KHERCHI et à mon père Mohamed pour leur patience et leur soutien sans limite.

Ainsi qu'à :

Mon frère Oussama et à mes sœurs

Toute la famille Mimouni

Mes amis et proches.

Tous mes camarades de la promotion de l'électrotechnique 2015-2019.

A la mémoire de notre défunt enseignant qui nous a quittés l'année dernière monsieur MENACER Arezki paix à son âme,

Qu'Allah le Tout-Puissant l'accueille dans Son Vaste Paradis.

Housseem Eddine MIMOUNI

REMERCIEMENTS

Avant de commencer la présentation de ce mémoire, je saisis l'occasion pour remercier du fond du cœur toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Je remercie en premier lieu '**Allah Le Tout-Puissant**' à Qui je suis entièrement reconnaissant de m'avoir accordé la santé ainsi que la réussite pour mener à bout ce travail.

Je tiens évidemment à remercier mon encadreur Monsieur **Mohamed Lotfi KHENE** pour ses conseils précieux, sa disponibilité et sa patience.

Je remercie également tous les membres du jury d'avoir bien voulu étudier avec attention mon travail.

Je réitère mes remerciements à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail

Mes remerciements à mon cousin **Ahmed amine MIMOUNI** pour son aide précieuse, je lui souhaite le meilleur.

Merci

Résumé

Ce travail concerne le diagnostic des défauts dans la machine asynchrone triphasé à cage d'écureuil. Le moteur asynchrone est de beaucoup le moteur le plus utilisé dans l'ensemble des applications industrielles, en raison de sa facilité de mise en œuvre, de ses bonnes performances et de son prix relativement bas, malgré ces avantages, un certain nombre de contraintes de natures très différentes peuvent affecter la durée de vie de cette machine en occasionnant des pertes économique considérable, ceci impose la mise en œuvre d'un système de surveillance. La simulation est un moyen efficace et économique, couramment utilisé pour faire des études préliminaires ou comparatives ou pour le diagnostic. Actuellement il existe plusieurs outils des simulations, parmi lesquels (**COMSOL Multiphysics**) qui est basé sur la méthode des éléments finis adopté comme une méthode de résolution des équations aux dérivées partielles caractéristiques au problème magnétodynamique. Dans cette logique nous proposons dans ce travail une étude comparative entre la comportement de la machine en état sain et le comportement de la machine doté de défaut rotorique, à travers les courbes du couple utile et la vitesse de rotation et à travers l'analyse spectrale afin de déterminer l'existence ou non d'un défaut.

المخلص

يهتم هذا العمل بدراسة تشخيص الاعطاب في الماكينة اللامتزامنة ذات القفص السنجابي ثلاثية الاطوار حيث يعتبر المحرك اللامتزامن المحرك الاكثر استخداما في جميع التطبيقات الصناعية وذلك نظرا لسهولة التنفيذ وأدائه الجيد وثمنه المنخفض نسبيا، ورغم كل هذه الايجابيات إلا انه قد تتعرض هذه الماكينة الى اعطاب مختلفة تؤثر على مدى حياتها الافتراضية وذلك يؤدي الى خسائر اقتصادية للمتعامل الصناعي، ولتفادي هذه الخسائر يجب وضع نظام مراقبة. المحاكاة وسيلة فعالة واقتصادية شائعة الاستخدام للدراسات الاولية سواء في مرحلة التطوير او اثناء التشغيل او التشخيص و من بينها (**COMSOL Multiphysics**) القائم على طريقة العناصر المحدودة المعتمدة كطريقة لحل المعادلات التفاضلية الجزئية المميزة للمشكلة المغناطيسية الدينامكية، وفي خضم هذا العمل اقترحنا مقارنة للماكينة في حالتها العادية وفي حالة وجود عطب وتلك المقارنة من خلال العزم الكهرومغناطيسي وسرعة الدوران و من خلال ايضا التحليل الطيفي لهما الذي يبين وجود عطب من عدمه.

Sommaire

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : Généralité Sur la machine asynchrone	
I.1.Introduction.....	3
I.2.Définition.....	3
I.3.Généralités.....	3
I.4. Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone.....	4
I.5.Constitution.....	4
I.5.1. Le stator.....	5
I.5.2. Le rotor.....	6
I.5.3.Les organes mécaniques.....	7
I.6.Caractéristiques.....	8
I.6.1.Fonctionnement à vide.....	8
I.6.2.Fonctionnement en charge.....	8
I.6.3.Caractéristique mécanique.....	9
I.7.Avantages et inconvénients la machine asynchrone.....	10
I.7.1 Les avantages.....	10
I.7.2. Les inconvénients.....	10
I.8.Réglage de la vitesse de rotation des moteurs asynchrones.....	11
I.8.1.Modes de réglage de la vitesse.....	11
I.8.2.Réglage de la vitesse de rotation des moteurs par changement du nombre de pôles.....	11
I.8.3.Réglage de la vitesse de rotation des moteurs par variation de la fréquence primaire.....	12

I.8.4.Réglage de la vitesse de rotation des moteurs par changement de la tension.....	12
I.9.Diagramme de puissance.....	12
I.10. Présentation des différents défauts dans la machine asynchrone.....	14
I.10.1.Défaut dû au réseau d'alimentation.....	14
I.10.2. Défaut dû au moteur asynchrone.....	14
I.10.2.1. Défaillances mécaniques.....	15
I.10.2.2. Défaillances électriques.....	16
I.11.Les différentes méthodes du diagnostic.....	17
I.11.1.Diagnostic des défauts par l'analyse spectrale et le suivi des grandeurs mesurables.....	17
I.11.2. Analyse des courants statoriques.....	18
I.11.3. Analyses vibratoires de la machine.....	18
I.11.4. Analyse des flux.....	19
I.11.5. Analyse du couple électromagnétique.....	19
I.12.Techniques de traitement de signal utilisées dans le diagnostic.....	19
I.12.1. Transformée de Fourier Rapide (TFR).....	20
I.12.2. Transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG).....	20
I.12.3. Transformée en ondelettes (TO).....	20
I.13. Conclusion.....	20

CHAPITRE II : Formulations Mathématiques Des Phénomènes Electromagnétiques

II.1.Introduction.....	22
II.2.Les équations de maxwell.....	22

II.2.1. Equation de Maxwell-Faraday.....	22
II.2.2. Equation de Maxwell-Ampère.....	23
II.2.3. Equations de conservations.....	24
II.2.4. Théorème de GAUSS.....	24
II.3. Loi de comportement des matériaux (milieux physiques).....	25
II.3.1. Induction électrique et champ électrique.....	25
II.3.2. Induction magnétique et champ magnétique.....	25
II.4. Les modèles électromagnétique.....	26
II.4.1. Le Modèle Electrostatique.....	26
II.4.2. Le Modèle Electrocinétique.....	27
II.4.3. Le Modèle Magnétostatique.....	27
II.4.3.1. Le modèle Magnétostatique scalaire.....	27
II.4.3.2. Le Modèle Magnétostatique vectorielle.....	28
II.4.4. Le Modèle Magnétodynamique.....	28
II.5. Condition aux limites.....	30
II.6. Conclusion.....	31

CHAPITRE III : Méthodes numériques et logiciel COMSOL- Multiphysics

III.1. Introduction.....	32
III.2. Différentes techniques de résolution des équations aux dérivées partielles.....	32
III.2.1. Méthode des Différences Finis (MDF).....	32
III.2.2. Méthode des volumes finis (MVF).....	33
III.2.3. Méthode de circuits couplés (MCC).....	34
III.2.4. Méthode intégrale de frontière (MIF).....	34
III.2.5. Méthode des éléments finis (MEF).....	35
III.2.5.1. Principe de la méthode des éléments finis.....	35

III.2.5.2.Démarche éléments finis.....	36
III.2.5.3.Discrétisation du domaine (maillage).....	37
III.2.5.4.Les avantages et les inconvénients de la méthode des éléments finis.....	37
III.2.5.5.Logiciels utilisant les éléments finis.....	38
III.3.Présentation de COMSOL «Multiphysics».....	38
III.3.1.Prise en main du logiciel.....	39
III.3.2.Étapes de résolution dans COMSOL Multiphysics.....	40
III.3.2.1.L'interface graphique de COMSOL.....	40
III.3.2.2.Choix du modèle.....	40
III.3.2.3.Choix du modèle Physique.....	41
III.3.2.4.Le type d'étude.....	42
III.3.2.5.Méthodologie de conception avec COMSOL- Multiphysics.....	42
III.4.Conclusion.....	43

CHAPITRE IV : Application et validation

IV.1.Introduction.....	44
IV.2.Description du système.....	44
IV.2.1. Introduction des propriétés des domaines.....	46
IV.2.2.Paramétrage et calcul du maillage.....	47
IV.3.Application N° 1 : Modélisation et simulation de la machine asynchrone triphasée à cage à l'état sain.....	48
IV.3.1.Interprétation.....	49
IV.3.2. Résultats de simulation.....	49
IV.3.2.1. Interprétation.....	52
IV.3.3. Etat sain par l'étude spectrale.....	53
IV.3.3.1.Interprétation.....	57

IV.4.Application N° 2 : Modélisation et simulation de la machine asynchrone triphasée à cage avec défaut d'une cassure de barre.....	57
IV.4.1.Simulation du défaut de cassure de barre rotorique par logiciel COMSOL-Multiphysics.....	58
IV.4.2.Interprétation.....	63
IV.4.3.Etat de cassure de barre par l'étude spectrale.....	63
IV.4.4.Interprétation.....	68
IV.4.5. Influence de la variation de la valeur de conductivité électrique σ	68
IV.4.5.1.Interprétation.....	72
IV.4.5.2.Etude spectrale de l'influence de variation de sigma.....	72
IV.4.5.3.Interprétation.....	78
IV.5.Application N° 3 : Modélisation et simulation de la machine asynchrone triphasée à cage avec défaut d'une deux cassures de barres.....	78
IV.5.1. Résultats de simulation.....	79
IV.5.2.Interprétation.....	80
IV.5.3.Etat de 2 cassures de barres par l'étude spectrale.....	81
IV.5.4.Interprétation.....	81
IV.6.Conclusion.....	82
Conclusion Générale.....	83
Bibliographie.....	85

Liste des Tableaux

Chapitre IV : Application et validation

Tableaux IV.1. Les dimension et les paramètres de la machine.....	45
--	----

Liste Des Figures

Chapitre I

Figure I. 1. Le stator d'une machine asynchrone	05
Figure I.2. Le rotor d'une machine asynchrone.....	06
Figure I.3. Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.....	08
Figure I.4. Caractéristique Mécanique $C_u=f(n)$	09
Figure I.5. Diagramme des puissances.....	12
Figure I.6. Diagramme de bilan de puissance d'une machine asynchrone.....	13
Figure I.7. Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte.....	16
Figure I.8. Exemple d'un défaut de cassure de barre d'un moteur asynchrone.....	17
Figure I.9. Mesures vibratoires sur la machine asynchrone.....	18

Chapitre III

Figure III.1. Configuration géométrique en 2D.....	33
Figure III.2. Maillage du domaine d'étude.....	33
Figure III.3. Elément de calcul	36
Figure III.4 Exemples d'éléments d'un maillage éléments fini	37
Figure III.5 Photo montrant l'interface d'ouverture du programme avec le logo dessus.....	39
Figure III.6. Fenêtre de démarrage du logiciel.....	40
Figure III.7. Les dimensions de l'espace en Comsol Multiphysics.....	41
Figure III.8. les choix du modèle physique	41
Figure III.9. Diagramme des étapes de conception avec COMSOL.....	43

Chapitre IV

Figure IV.1. La géométrie de la machine.....	45
Figure IV.2. Une coupe de cette machine.....	46
Figure IV.3. Propriétés des domaines.....	47
Figure IV.4. Les étapes à suivre pour faire le maillage.....	47
Figure IV.5. Le maillage du domaine d'étude.....	47
Figure IV.6. Les vecteurs de l'induction magnétique à l'instant $t = 6s$	48
Figure IV.7. La densité du courant avec les lignes du vecteur de potentiel magnétique à l'instant $t = 6s$	48
Figure IV.8. (a-f) La variation de couple a l'état sain pour différents valeur de la charge.	50
Figure IV.9. (a-f) : La variation instantanée de la vitesse de rotation a l'état sain pour différents valeur du couple résistant respectivement $C_r = 0, 4, 8, 12, 15$ et $20 N.m$	52
Figure IV.10. Spectre du couple électromagnétique pour une machine saine à vide.....	53
Figure IV.11. Spectre du couple électromagnétique pour une machine saine $C_r=4N.m$	53
Figure IV.14. Spectre du couple électromagnétique pour une machine saine $C_r=15N.m$	54
Figure IV.13. Spectre du couple électromagnétique pour une machine saine $C_r=12N.m$	54
Figure IV.12. Spectre du couple électromagnétique pour une machine saine $C_r=8N.m$	54
Figure IV.15. Spectre du couple électromagnétique pour une machine saine $C_r=20N.m$	55
Figure IV.16. Spectres de la vitesse de rotation a l'état sain pour une machine à vide.....	55
Figure IV.17. Spectres de la vitesse de rotation a l'état sain pour $C_r=4N.m$	55
Figure IV.18. Spectres de la vitesse de rotation a l'état sain pour $C_r=8N.m$	56
Figure IV.19. Spectres de la vitesse de rotation a l'état sain pour $C_r=12N.m$	56
Figure IV.20. Spectres de la vitesse de rotation a l'état sain pour $C_r=15N.m$	56
Figure IV.21. Spectres de la vitesse de rotation a l'état sain pour $C_r=20N.m$	57

Figure IV.22. Le cassure de barre dans logiciel COMSOL-Multiphysics.....	58
Figure IV.23. (a-f) La variation de couple avec cassure de barre pour différents valeur de la charge (à vide, 4, 8, 12, 15, 20).....	60
Figure IV.24. (a-f) La variation de vitesse avec cassure de barre pour différents valeur de la charge (à vide, 4, 8, 12, 15, 20)	61
Figure IV.25. Couple électromagnétique pour une machine asynchrone saine et une machine asynchrone avec 1 barre cassée (en pleine charge).....	62
Figure IV.26 Vitesse de rotation pour une machine asynchrone saine et une machine asynchrone avec 1 barre cassée (en pleine charge).....	62
Figure IV.27. Spectre du couple électromagnétique pour une machine avec défaut à vide.	63
Figure IV.28. Spectre du couple électromagnétique pour une machine avec défaut $C_r=4N.m$	64
Figure IV.29. Spectre du couple électromagnétique pour une machine avec défaut $C_r=8N.m$	64
Figure IV.30. Spectre du couple électromagnétique pour une machine avec défaut $C_r=12N.m$	64
Figure IV.31. Spectre du couple électromagnétique pour une machine avec défaut $C_r=15N.m$	65
Figure IV.32. Spectre du couple électromagnétique pour une machine avec défaut $C_r=20N.m$	65
Figure IV.33. Spectres de la vitesse de rotation à cassure de barre pour une machine à vide.....	65
Figure IV.34. Spectres de la vitesse de rotation à cassure de barre pour $C_r=4N.m$	66
Figure IV.35. Spectres de la vitesse de rotation à cassure de barre pour $C_r=8N.m$	66
Figure IV.36. Spectres de la vitesse de rotation à cassure de barre pour $C_r=12N.m$	66
Figure IV.37. Spectres de la vitesse de rotation à cassure de barre pour $C_r=15N.m$	67
Figure IV.38. Spectres de la vitesse de rotation à cassure de barre pour $C_r=20N.m$	67

Figure IV.39. Spectre du couple électromagnétique pour une machine saine et une machine avec défaut (en pleine charge).....	67
Figure IV.40. (a-j) La variation instantanée du couple utile pour différents valeurs de Sigma.....	70
Figure IV.41. (a-j) La variation instantanée de la vitesse de rotation pour différents valeurs de sigma.....	72
Figure IV.42. Spectre du couple électromagnétique pour une machine sain en plein charge $\sigma=3.72.10^7$	72
Figure IV.43. Spectre du couple électromagnétique pour une machine en plein charge $\sigma=3.72.10^6$	73
Figure IV.44. Spectre du couple électromagnétique pour une machine en plein charge $\sigma=1.86.10^6$	73
Figure IV.45. Spectre du couple électromagnétique pour une machine en plein charge $\sigma=1.24.10^6$	73
Figure IV.46. Spectre du couple électromagnétique pour une machine en plein charge $\sigma=9.3.10^5$	73
Figure IV.47. Spectre du couple électromagnétique pour une machine en plein charge $\sigma=7.4.10^5$	74
Figure IV.48. Spectre du couple électromagnétique pour une machine en plein charge $\sigma=6.2.10^5$	74
Figure IV.49. Spectre du couple électromagnétique pour une machine en plein charge $\sigma=5.314.10^5$	74
Figure IV.50. Spectre du couple électromagnétique pour une machine en plein charge $\sigma=4.65.10^5$	74
Figure IV.51. Spectre du couple électromagnétique pour une machine en plein charge $\sigma=4.133.10^5$	75
Figure IV.52. Spectre du couple électromagnétique pour une machine en plein charge $\sigma=3.72.10^5$	75
Figure IV.53. Spectre de la vitesse de rotation pour une machine sain en plein charge $\sigma=3.72.10^7$	75
Figure IV.54. Spectre de la vitesse de rotation pour une machine en plein charge	

$\sigma=3.72.10^6$	76
Figure IV.55. Spectre de la vitesse de rotation pour une machine en plein charge	
$\sigma=1.86.10^6$	76
Figure IV.56. Spectre de la vitesse de rotation pour une machine en plein charge	
$\sigma=1.24.10^6$	76
Figure IV.57. Spectre de la vitesse de rotation pour une machine en plein charge	
$\sigma=9.3.10^5$	76
Figure IV.58. Spectre de la vitesse de rotation pour une machine en plein charge	
$\sigma=7.4.10^5$	77
Figure IV.59. Spectre de la vitesse de rotation pour une machine en plein charge	
$\sigma=6.2.10^5$	77
Figure IV.60. Spectre de la vitesse de rotation pour une machine en plein charge	
$\sigma=5.314.10^5$	77
Figure IV.61. Spectre de la vitesse de rotation pour une machine en plein charge	
$\sigma=4.65.10^5$	77
Figure IV.62. Spectre de la vitesse de rotation pour une machine en plein charge	
$\sigma=4.133.10^5$	78
Figure IV.63. Spectre de la vitesse de rotation pour une machine en plein charge	
$\sigma=3.72.10^5$	78
Figure IV.64. Le cassure de 2 barres dans logiciel COMSOL-Multiphysics.....	79
Figure IV.65. Couple électromagnétique pour une machine asynchrone saine et une machine asynchrone avec défaut (en pleine charge).....	79
Figure IV.66. Vitesse de rotation pour une machine asynchrone saine et une machine asynchrone avec défaut (en pleine charge).....	80
Figure IV.67. Spectre du couple électromagnétique pour une machine saine et une machine avec défaut (en pleine charge).....	81

Liste des symboles et abréviations

symboles	Définition
\vec{H}	Vecteur champs magnétique ($A.m^{-1}$)
\vec{B}	Vecteur induction magnétique (T)
\vec{E}	Vecteur champs électrique ($V.m^{-1}$)
\vec{J}_c	Vecteur densité du courant électrique de conduction ($A.m^{-2}$)
\vec{D}	Vecteur induction électrique (vecteur de déplacement) ($A.m^{-2}$)
\vec{J}_x	Densité de courant d'excitation
\vec{v}	Vitesse d'écoulement du fluide
\vec{H}_c	Champs magnétique critique
I	Le courant
p	Nombre de paires de pôles
Tc	Le temps critique
F	Force électromagnétique
μ	Perméabilité magnétique
μ_0	Perméabilité magnétique à vide [H/m]
μ_r	Perméabilité magnétique relative
σ	Conductivité électrique
ϵ	Permittivité électrique
ρ	Densité de charge volumique ($C.m^{-3}$)
q	Charge électrique
e	F.é.m. induite
\emptyset	Matrice dans la base des fonctions
ω_s	Pulsation [rad/s]
g	le glissement
Ω_s	Vitesse synchrone de rotation [rad/s].
p	Nombre de paires de pôles.
Ns	Vitesse de rotation de synchronisme du champ tournant [tr/s]
n	Vitesse de rotation du rotor [tr/s]
P _e	la puissance électromagnétique
P _{jr}	les pertes joules rotorique
P _m	la puissance mécanique
P _u	la puissance utile
FFT	la technique du Transformé de Fourier
MEF	Méthode des éléments finis
MDF	Méthode des différences finies
MVF	Méthode des volumes finis
MCC	Méthode de circuits couplés
Rmm	Machines rotatives magnétiques

Introduction

générale

Introduction générale

Les machines asynchrones triphasées à cage d'écureuil sont les plus fréquemment utilisées dans tous les secteurs industriels en raison de leurs robustesses, de leurs simplicités de construction et de leurs bas coûts. Néanmoins, celles-ci subissent au cours de leurs durées de vie un certain nombre de sollicitations externes ou internes qui peuvent les rendre défaillantes.

Grâce à sa grande flexibilité, la simulation est devenue l'outil privilégié pour évaluer les performances et le comportement des systèmes sous des conditions extrêmes ou en mode de défaillance. Il faut noter que la simulation ne peut exister sans modélisation, en effet, la simulation n'est autre que la mise en application d'un modèle bien déterminé. En outre, l'un des objectifs les plus importants, dans le cadre du diagnostic, concerne la mise au point des modèles de simulation les plus fiables possibles, représentant le fonctionnement défaillant de la machine. L'étape de la modélisation s'avère donc indispensable pour la caractérisation et la maîtrise des phénomènes qui peuvent y apparaître. [1]

Dans le domaine du diagnostic de la machine asynchrone, la méthode des éléments finis est utilisée dans le but de comprendre et de quantifier les conséquences locales d'un défaut sur les différentes parties de la machine. A titre d'exemple, la méthode des éléments finis permet d'étudier les effets locaux du défaut de rupture de barres de la cage rotorique à savoir un échauffement local excessif dû à l'augmentation des courants circulant dans les barres voisines et une forte sollicitation électrodynamique de ces mêmes barres voisines pouvant conduire à la propagation du défaut. [1]

Le logiciel COMSOL-Multiphysics nous facilite notre travail pour faire la modélisation des phénomènes électromagnétique et mécanique dans une machine asynchrone à cage. Une modélisation visant le comportement général de la machine en régime dynamique et permanent, mais qui peut servir plus particulièrement le domaine de diagnostic des défauts.

L'objectif de notre travail est le diagnostic de la machine asynchrone par une méthode globale qui est basé sur la méthode des éléments finis sous logiciel COMSOL-Multiphysics.

Dans ce contexte, nous étudions l'influence des différentes valeurs de couple résistant pour les cas suivant (état sain, une seule barre cassée, deux barres cassée) sur le comportement de la machine. Et nous étudions leurs signatures spectrales sur le couple utile et la vitesse de rotation de la machine étudiée.

Pour cela notre mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à l'étude des composants et du fonctionnement de la machine asynchrones à cage d'écureuil. Nous présentons une brève introduction sur les éléments de constitution de la machine et leurs principes de fonctionnement. Ce chapitre présente aussi les différents types de défauts qui peuvent apparaître dans les machines asynchrones. Le chapitre se termine par une présentation des différentes techniques de diagnostic actuellement appliquée à la machine asynchrone.

Le deuxième chapitre sera consacré aux formulations mathématiques des phénomènes électromagnétiques qui sont régis par les équations de Maxwell et les équations caractéristiques du milieu étudié.

Le troisième chapitre, on s'intéresse dans la première partie à une présentation des méthodes numériques utilisé pour la résolution des équations aux dérivées partielles que nous avons mentionnées dans le chapitre précédent. La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la présentation du logiciel COMSOL, ainsi que la démarche à suivre pour la modélisation de la machine.

Le quatrième chapitre, présentera les résultats des simulations de la modélisation d'une machine asynchrone pour différents cas (état sain, et avec défaut) pour différentes valeur de la charge, et l'influence de la variation de la conductivité électrique de barre d'aluminium.

Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale représentant une synthèse globale de notre travail et nous proposons quelques perspectives.

Chapitre -I-

Généralités Sur la Machine asynchrone

I.1.Introduction

Le moteur asynchrone est actuellement le moteur électrique dont l'usage est le plus répandu dans les applications industrielles ou domestiques de l'électricité, du fait de sa facilité d'installation, sa simplicité de construction, sa facilité d'utilisation et d'entretien, sa robustesse, son faible prix de revient et son excellente fiabilité. [2]

Malgré ses qualités, la machine asynchrone peut présenter des anomalies et des défauts structurels, parmi lesquels la rupture totale ou partielle des barres rotorique ou des portions d'anneau, court circuit entre spires au stator ainsi que le défaut d'excentricité. Pour ces raisons, il est très intéressant de développer des outils de diagnostic pour la détection d'une manière anticipée les défauts pouvant surgir dans la machine. [3]

I.2.Définition

Une machine asynchrone est une machine à courant alternatif dont la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique tournant ne sont pas égales .La vitesse rotorique est toujours en retard par rapport à la vitesse du champ statorique .La machine asynchrone est dite machine à induction car l'énergie transférée du stator au rotor ou inversement se fait par induction électromagnétique

I.3.Généralités

Les machines asynchrones sont très utilisées (on estime que 80% des moteurs de la planète sont des moteurs asynchrones) car leur coût est inférieur à celui des autres machines, de plus ces machines sont robustes. Comme les autres machines, la machine asynchrone est réversible et de très nombreuses génératrices asynchrones de puissance inférieure à quelques 5MW fournissent un sur plus d'énergie active aussi bien sur des réseaux terrestres qu'à bord des navires. La gamme de puissance couverte par les machines asynchrones est très étendue: de quelques 5W pour des moteurs asynchrones monophasés à bagues de déphasage aux 36,8 MW des moteurs à cage d'écureuil des futurs porte-avions britannique de la classe «HMS Queen Elisabeth», en passant par les 24 MW des moteurs asynchrones à cage d'écureuil assurant la propulsion de la série de paquebots «NorwegianEpic».[5]

I.4. Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone

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 n . [4]

Lorsque le champ tournant est sinusoïdale, sa vitesse de rotation est

$$n_1 = \frac{f}{p} \quad (\text{I.1})$$

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 $n \neq n_1$, le champ serait immobile par rapport au rotor et aucune courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique. [4]

Le rapport

$$g = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad \text{Ou} \quad g = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot 100\% \quad (\text{I.2})$$

Est appelé glissement d'une machine asynchrone

I.5. Constitution

Deux composantes principales constituent le moteur asynchrone, souvent appelé moteur à induction. Elles sont faites de tôles d'acier au silicium et comportent des encoches dans lesquelles on place les enroulements. L'une des composantes, appelée le stator, est fixe. L'autre composante, nommée le rotor, est montée sur un axe et libre de tourner.

Dans les encoches régulièrement réparties sur la face interne du stator sont logés trois enroulements identiques, à "p" paires des pôles; leurs axes sont distants entre eux d'un angle électrique égal à $2\pi/3$. Les phases du stator sont alimentées par un réseau triphasé de tensions sinusoïdales à fréquence et amplitude constante ou par un onduleur de tensions ou de courant à fréquence et à amplitude réglables. Alors le rotor, il peut être réalisé: [06]

- Soit par un système d'enroulement triphasés (rotor bobiné), raccordés en étoile trois bagues sur les quelles frottent trois balais fixes accessible par la plaque aux bornes et mis en court-circuit pendant les régimes de fonctionnements normaux.
- Soit par une cage conductrice intégrée aux tôles ferromagnétique (rotor à cage). il est admis que la deuxième structure du rotor est électriquement équivalente à la première, quand il s'agit de cages non profondes ou de cages simples (non double). [06]

I.5.1. Le stator

Le stator consiste en un empilement de tôles d'acier au silicium dont l'épaisseur varie entre 0,35 et 0,50 mm. On utilise les tôles minces dans les moteurs pour lesquels on doit minimiser les pertes dans le circuit magnétique. Dans le cas où le diamètre du moteur ne dépasse pas quelques centaines de millimètres, les tôles sont découpées en une seule pièce. Pour les moteurs de grand diamètre, les tôles du stator et du rotor sont découpées par sections.

Afin de limiter l'effet des courants de Foucault, on recouvre habituellement les tôles d'une couche mince de vernis ou de silicate de soude. [06]



Figure I.1. Le stator d'une machine asynchrone. [09]

I.5.2. Le rotor

C'est l'élément mobile du moteur. Comme le circuit magnétique du stator, il est constitué d'un empilage de tôles minces isolées entre elles et formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. [06]



Figure I.2. Le rotor d'une machine asynchrone. [09]

a) Le rotor à cage

Plusieurs types de rotor à cage existent, en citant ces moteurs dans l'ordre du moins répandu au plus courant :

- **Rotor à cage résistante** Le rotor résistant existe surtout en simple cage. La cage est fermée par deux anneaux résistants (alliage particulier, section réduite, anneaux d'inox ...etc.). Ces moteurs présentent un fort glissement au couple nominal. Leur couple de démarrage est élevé et le courant de démarrage faible. En raison des pertes dans le rotor, leur rendement est faible. [06]
- **Rotor à simple cage** : Dans des trous ou dans des encoches disposées sur le pourtour du rotor (à l'extérieur du cylindre constitué par l'empilage de tôles) sont placés des conducteurs reliés à chaque extrémité par une couronne métallique et sur lesquels vient s'exercer le couple moteur généré par le champ tournant. Pour que le couple soit régulier, les conducteurs sont légèrement inclinés par rapport à l'axe du moteur. L'ensemble a l'aspect d'une cage d'écureuil, d'où le nom de ce type de rotor. [06]

- **Rotor à double cage** : Il comporte deux cages concentriques, l'une extérieure, de faible section et assez résistante, l'autre intérieure, de forte section et de résistance plus faible. [06]
- **Rotor à encoches profondes** : C'est la réalisation standard. Les conducteurs rotoriques sont moulés dans les encoches du rotor qui sont de forme trapézoïdale dont le petit coté du trapèze se situe à l'extérieur du rotor. Le fonctionnement est analogue au moteur à double cage : l'intensité du courant rotorique varie en fonction inverse de sa fréquence. Ainsi : [06]
 - Au début du démarrage, le couple est élevé et l'appel de courant réduit.
 - En régime établi, la vitesse est sensiblement celle du moteur à simple cage.

b) Le rotor bobiné (rotor à bagues)

Dans des encoches pratiquées à la périphérie du rotor sont logés des enroulements identiques à ceux du stator. Généralement le rotor est triphasé. Une extrémité de chacun des enroulements est reliée à un point commun (couplage étoile). Les extrémités libres peuvent être raccordées sur un coupleur centrifuge ou sur trois bagues en cuivre, isolées et solidaires du rotor. Sur ces bagues viennent frotter des balais à base de graphite raccordés au dispositif de démarrage, En fonction de la valeur des résistances insérées dans le circuit rotorique, ce type de moteur peut développer un couple de démarrage s'élevant jusqu'à 2,5 fois le couple nominal. [06]

I.5.3. Les organes mécaniques

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements pour les machines de petite et moyenne puissance. [06]

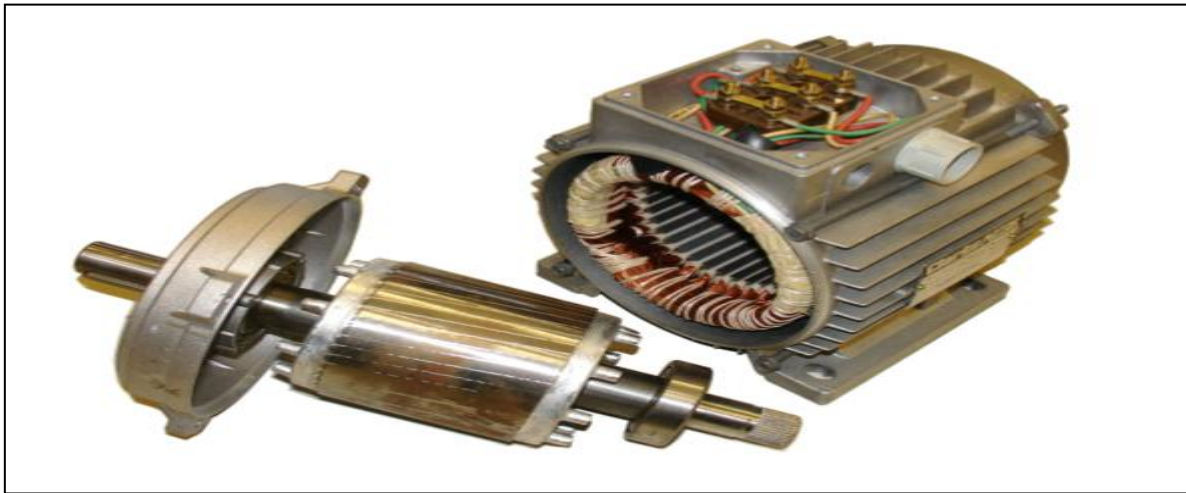


Figure I.3. Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. [05]

I.6.Caractéristiques

I.6.1.Fonctionnement à vide

A vide le moteur n'entraîne pas de charge : [06]

- ❖ Le glissement est presque nul est le moteur tourne à la vitesse proche du synchronisme, $g \approx 0$ et donc $n_0 = 0$.
- ❖ Le courant est compris entre 50 % et 30 % du courant de pleine charge. Ce courant est semblable au courant d'excitation d'un transformateur. Il est composé en majeure partie d'un courant magnétisant qui produit le flux tournant ϕ_m et d'une faible composante active pour fournir les pertes par frottement et ventilation, plus les pertes dans le fer.
- ❖ La puissance réactive requise pour créer le champ tournant est donc considérable et, afin de la réduire. On est amené à utiliser un entrefer aussi petit que possible, en tenant compte des tolérances mécaniques acceptables.
- ❖ Le facteur de puissance est compris entre 20 % pour les petits moteurs et 5 % pour les gros.
- ❖ Le rendement est nul, car la machine ne débite aucune puissance utile.

I.6.2.Fonctionnement en charge

Lorsque le moteur fonctionne en charge : [06]

- ❖ La puissance réactive (kVAR) requise pour produire ces trois flux est légèrement supérieure à celle absorbée à vide.
- ❖ La puissance active (kW) absorbée par le moteur varie proportionnellement avec la charge mécanique.
- ❖ Le facteur de puissance du moteur (kW/kVA) s'améliore à mesure que la charge croît : à pleine charge, il est compris entre 80 % pour les petits moteurs et 90 % pour les gros.
- ❖ Le rendement à pleine charge est particulièrement élevé ; il peut atteindre 98 % pour les grosses machines.

I.6.3. Caractéristique mécanique

La caractéristique mécanique représente la courbe du couple en fonction de la vitesse de rotation.

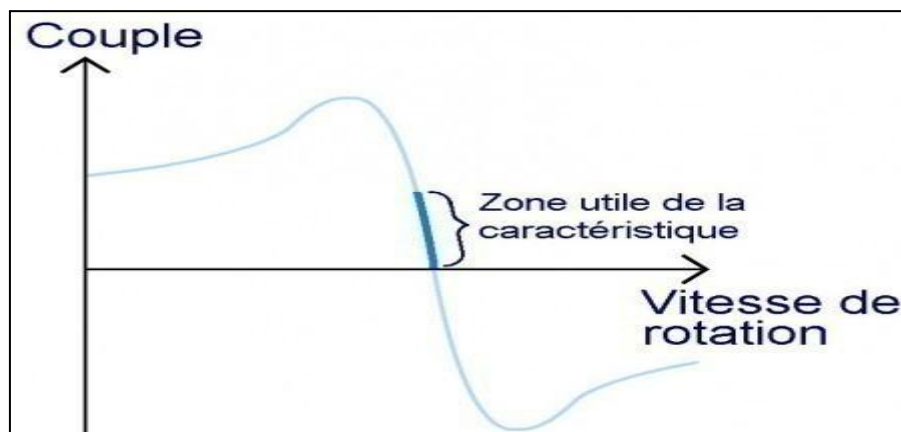


Figure I.4. Caractéristique Mécanique $C_u=f(n)$.

On constate que le couple est nul à la vitesse de synchronisme « N_s ». En effet, si le rotor tourne au synchronisme n_s , le rotor ne "verrait" plus de champ tournant autour de lui. Lorsqu'on freine le moteur (la vitesse de rotation baisse) : le couple augmente, passe par un maximum, puis redécroît. [06]

Pour une vitesse de rotation nulle (moteur immobilisé ou au démarrage), le couple existe et correspond au couple de démarrage. [06]

* Zone utile de la caractéristique

En pratique, le moteur asynchrone ne doit fonctionner que dans une zone utile de fonctionnement.

La zone utile de fonctionnement va du synchronisme (moteur à vide) à un couple qui correspond au couple maximal (moteur à pleine charge). Au delà, on pourrait certes obtenir une puissance mécanique supérieure, mais le courant excéderait ce que le moteur peut supporter, d'où un échauffement excessif des bobinages. Par ailleurs, le rendement se dégrade lorsqu'on dépasse le couple maximal et que la vitesse de rotation baisse trop. [06]

I.7. Les Avantages et Les inconvénients de la machine asynchrone

I.7.1 Les avantages

Il ya plusieurs avantages dans le moteur asynchrone : [07]

- Structure simple.
- Robuste et facile à construire.
- Utilisé dans la puissance moyenne et élevés.
- Relié directement aux réseaux industriels à tension et fréquence.
- Il tourne à vitesse variable différente de la vitesse synchrone.
- Il est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité de l'entraînement à vitesse.

I.7.2. Les inconvénients

Parmi les inconvénients de la machine asynchrone : [07]

- Le couple de démarrage très élevé que les couples nominales.
- La vitesse dépend de la charge.
- Variation de vitesse (nécessité d'un variateur de vitesse).
- La structure dynamique est fortement non linéaire et l'existence d'un fort couplage.

I.8.Réglage de la vitesse de rotation des moteurs asynchrones

I.8.1.Modes de réglage de la vitesse

Le problème du réglage de la vitesse des moteurs électriques en général et des moteurs asynchrones en particulier est un problème très important. Dans plusieurs branches de l'industrie, les exigences vis-à-vis des caractéristiques de réglage des moteurs sont très serrées en ce qui concerne les limites et la progressivité du réglage ainsi que son indice économique. Les caractéristiques de réglage des moteurs asynchrones sont inférieures à celles des moteurs à courant continu et ceci d'autant plus que les limites de réglage sont plus larges. [04]

Beaucoup a été fait pour améliorer les caractéristiques de réglage des moteurs asynchrones mais jusqu'à présent ceux-ci ne peuvent pas remplacer les moteurs à courant continu dans les installations aux exigences serrées du point de vue des propriétés de réglage du moteur. [04]

On distingue les méthodes de réglage ou on agit sur le moteur :

1^{er} coté stator et 2^{ème} coté rotor.

Parmi les premières méthodes il faut remarquer :

- Changement de la tension appliquée au moteur,
- Changement du nombre de paires de pôles
- Changement de la fréquence du réseau.

En agissant sur le moteur coté rotor on peut régler la vitesse :

- En faisant varier la résistance dans le circuit rotorique
- En introduisant dans le circuit rotorique une F.E .M complémentaire de même fréquence que la F.E.M. principale du rotor.

Pour réaliser le dernier mode de réglage de la vitesse il faut disposer d'une ou de plusieurs machines complémentaires. [04]

I.8.2.Réglage de la vitesse de rotation des moteurs par changement du nombre de pôles

Ce genre de réglage consiste à changer le nombre de pôles de la machine en changeant la connexion des enroulements statoriques, ce type de réglage ne peut être utilisé que pour les

moteurs ayant la possibilité de changer la connexion de leurs enroulements statoriques, la gamme de vitesse est étroite, une mauvaise souplesse de réglage car les vitesses sont échelonnées. [08]

I.8.3. Réglage de la vitesse de rotation des moteurs par variation de la fréquence primaire

La fréquence de rotation du moteur asynchrone est directement proportionnelle à la fréquence de la tension d'alimentation d'où la vitesse de synchronisme. La vitesse d'un moteur asynchrone peut être contrôlée au-dessus et au-dessous de la vitesse nominale en changeant la fréquence de la tension d'alimentation. On essaiera donc de créer pour les enroulements statoriques un réseau à fréquence variable ce sont les onduleurs de tension. [08]

On peut aussi chercher à injecter des courants dans les enroulements pour imposer le couple de la machine ce sont les onduleurs de courant ou commutateurs de courant. On peut également convertir directement la fréquence du réseau industriel en une fréquence variable plus faible (de 0 à 1/3 de la fréquence réseau) à l'aide d'un cyclo-convertisseur à commutation naturelle piloté lui aussi en fréquence en courant ou vectoriellement. [08]

I.8.4. Réglage de la vitesse de rotation des moteurs par changement de la tension

Le couple électromagnétique de la machine asynchrone est proportionnel au carré de la tension d'alimentation statoriques. Il est donc possible d'envisager un ajustement de la vitesse au-dessous de la vitesse nominale en modifiant la tension d'alimentation statoriques avec un gradateur triphasé ou une auto transformatrice triphasée. [08]

I.9. Diagramme de puissance

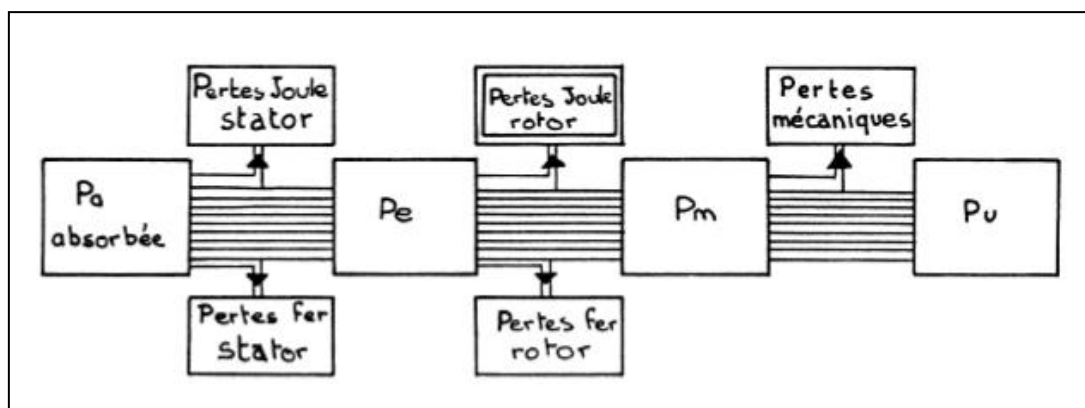


Figure I.5. Diagramme des puissances. [05]

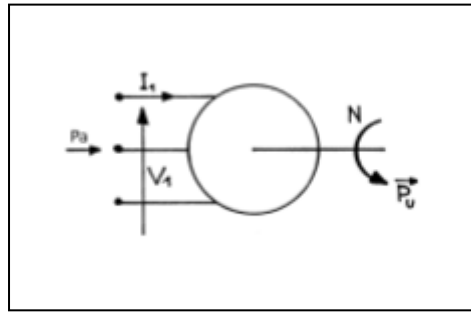


Figure I.6. Diagramme de bilan de puissance d'une machine asynchrone. [05]

- Pertes fer stator : comme pour le transformateur, elles seront liées au carré de la tension: P_f .
- Puissance électromagnétique P_e : c'est la puissance transmise du stator au rotor par les inductions tournantes à la vitesse N_s :

$$P_e = C_e \cdot 2\pi \cdot N_e. \quad (I.3)$$

- Pertes Joule rotor : si R_2 est la résistance d'une phase rotorique et I_2 le courant rotorique, on aura :

$$P_{jr} = 3 \cdot R_2 \cdot I_2^2. \quad (I.4)$$

Pour une cage, on définit une résistance et un courant équivalent en assimilant la cage à un enroulement polyphasé.

- Pertes fer rotoriques : elles sont faibles en fonctionnement normal car la fréquence rotorique est petite. On les négligera en pratique devant les pertes joule dans les conducteurs du rotor.
- La puissance mécanique est fournie par le rotor à la vitesse N :

$$P_m = C_m \cdot 2\pi \cdot N = C_m \cdot \Omega. \quad (I.5)$$

- Les pertes mécaniques correspondent à un couple de frottement C_f .
- La puissance utile, délivrée sur l'arbre de sortie du moteur, s'écrit en introduisant le couple utile:

$$P_u = C_u \cdot 2\pi \cdot N = C_u \cdot \Omega. \quad (I.6)$$

On a évidemment: $C_u = C_m - C_f$. L'équilibre dynamique du rotor implique l'égalité des couples C_e et C_m . Il en résulte une propriété remarquable du moteur:

$$P_e = C_e \cdot 2\pi \cdot N_s = P_m + P_{JR} = C_e \cdot 2\pi \cdot N + P_{JR} \quad (I.7)$$

$$PJR = Ce.2\pi.(N_s - N) = Ce.2\pi.g.N_s = g.Pe \quad (I.8)$$

$$PJR = g.Pe = g.Ce.\Omega_s \quad (I.9)$$

En négligeant les pertes fer rotor, on voit que les pertes Joule rotor sont directement liées à la production de puissance électromagnétique. Si Ce n'est pas nul, comme g est nécessairement différent de zéro, il faut qu'il y ait des pertes Joule rotor. Cette constatation, spécifique des machines asynchrones, implique une incidence directe sur le rendement. [05]

I.10. Présentation des différents défauts dans la machine asynchrone

I.10.1. Défaut dû au réseau d'alimentation

Les réseaux et les installations électriques sont le siège d'incidents de nature aléatoire, dont les plus fréquents sont : [03]

- Court-circuit entre les phases.
- Coupures de phase d'alimentation.
- Déséquilibre des tensions d'alimentation.

Les répercussions de ces anomalies sur la continuité du service et le fonctionnement des équipements dépendent de la nature du défaut. Ce dernier est provoqué soit dans les réseaux aériens soit par des contraintes de nature : [03]

- climatique (pluie, foudre,...).
- d'environnement (branches d'arbres, plombs de chasses,...).
- par suite de l'interconnexion des différents réseaux.

Il en résulte que les installations électriques peuvent subir un nombre difficilement prévisible de perturbations de tension dont l'influence se caractérise par, soit une chute de tension transitoire, soit une coupure brève. Dans les cas les plus graves, cela provoque la coupure de longue durée. [03]

I.10.2. Défaut dû au moteur asynchrone

Les défaillances qui peuvent affectées la machine sont d'origines diverses: électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques.

I.10.2.1. Défaillances mécaniques

- **Défauts de roulement**

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tous types des machines électriques.

Les défauts des roulements qui ont de nombreuses causes telles que l'écaillage de fatigue, la contamination du lubrifiant, une charge excessive ou des causes électrique comme la circulation de courants de fuite induits par les onduleurs , les problèmes de rotation au sein de la culasse de roulement causés par un enroulement abîmé, écaillé ou fissuré peuvent créer des perturbations au sein de la machine, comme les courants électriques circulent au niveau des roulements d'une machine asynchrone et pour des vitesses importantes peut provoquer la détérioration de ces derniers. [03]

- **Défauts d'excentricité**

Parfois, la machine peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor). Ce phénomène est appelé excentricité dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut de roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage).

On distingue trois catégories d'excentricité : [03]

- **L'excentricité statique:** est généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator
- **L'excentricité dynamique :** se manifeste lorsque le centre de rotation du rotor différent du centre géométrique du stator mais, de plus le centre de rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator. Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique ou statorique.
- **L'excentricité mixte :** représente la somme des deux cas statique et dynamique.

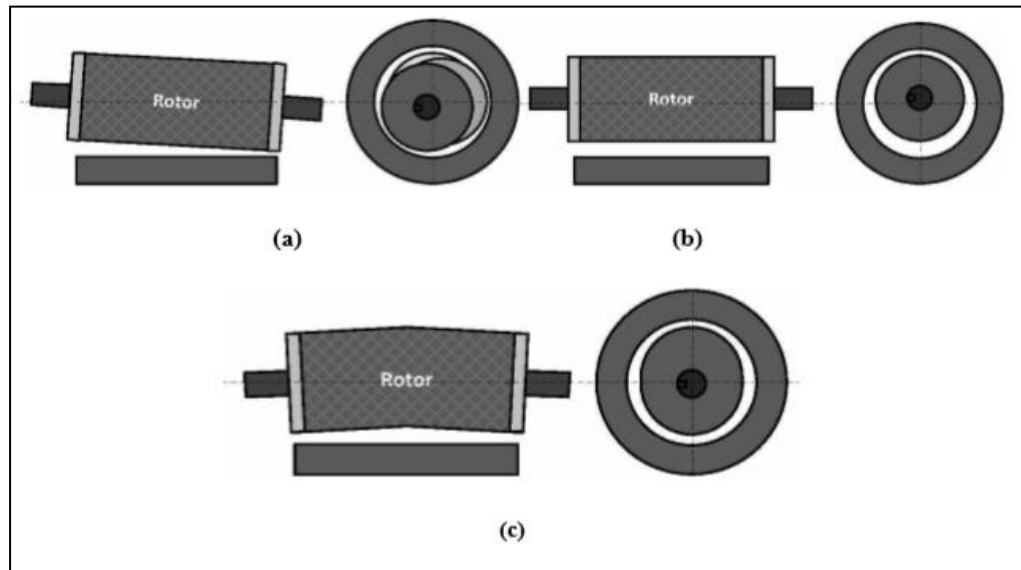


Figure I.7. Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte. [01]

I.10.2.2. Défaillances électriques

- **Défauts statorique**

L'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques statorique de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses. On peut citer à titre d'exemple, les défauts de type court circuits entre spires de la même phase est un défaut fréquent qui peut apparaître soit au niveau des têtes de bobines soit dans les encoches. Ce type de défauts peut être causé par une dégradation des isolants des spires du bobinage statorique. On peut citer aussi les courts circuits entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou entre deux phases statorique. [03]

- **Défauts rotorique**

L'analyse du spectre du courant statorique en régime permanent fournit des indications sur les défaillances rotorique telles que les ruptures des barres, d'anneaux de court-circuit : [24]

- **Défaut de cassure des barres**

La rupture des barres d'une machine asynchrone est un défaut les plus couramment étudié en laboratoire en raison de sa simplicité de réalisation.

La rupture de barre provoque une dissymétrie du rotor. Le résultat de la dissymétrie réside dans la création d'un champ tournant en sens opposé à celui généré par le stator et cela à la fréquence de glissement par conséquent, il y'aura réaction d'un courant supplémentaire dans le bobinage statorique. [25]

- Cassure d'une portion d'anneau de court-circuit

La cassure de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces cassures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux, d'autant que les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotorique. [24]

Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassures.

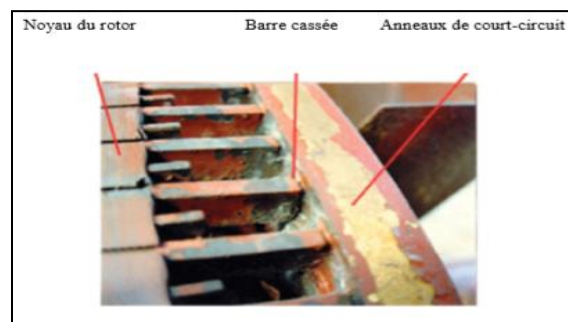


Figure I.8 Exemple d'un défaut de cassure de barre d'un moteur asynchrone. [24]

I.11. Les différentes méthodes du diagnostic

I.11.1. Diagnostic des défauts par l'analyse spectrale et le suivi des grandeurs mesurables

L'analyse spectrale est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barres et ou de portions d'anneaux au rotor des machines asynchrones, la dégradation des roulements, les excentricités et les courts-circuits dans les bobinages. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation. [26]

La surveillance par analyse spectrale de la machine asynchrone consiste à effectuer une simple transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut, et à visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine.

Les grandeurs accessibles et mesurables d'une machine asynchrone peuvent être des grandeurs électriques (plus particulièrement les courants de ligne), soit les grandeurs mécaniques (vibration, couple électromagnétique). [26]

I.11.2. Analyse des courants statoriques

L'analyse des courants statoriques dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus couramment utilisée car le spectre résultant contient une source de renseignement sur la majorité des défauts électriques et magnétiques pouvant apparaître au sein d'une machine asynchrone. [26]

Nous savons que le suivi de l'amplitude des composantes caractéristiques de fréquence dans le spectre du courant permet de se renseigner sur l'état de la cage rotorique. Par d'exemple le spectre du courant statorique lorsque la machine fonctionne avec un rotor sain et un rotor défaillant (une barre cassée). Nous apercevons une nette augmentation de l'amplitude de ces composantes, ce qui traduit la présence d'un défaut au sein de la cage d'écureuil. [26]

I.11.3. Analyses vibratoires de la machine

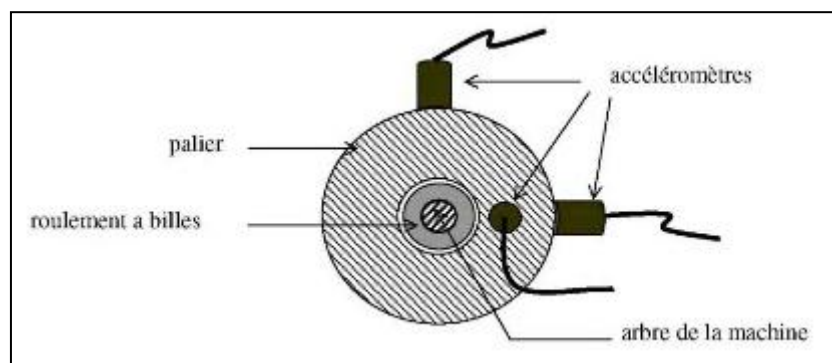


Figure I.9. Mesures vibratoires sur la machine asynchrone. [26]

L'analyse vibratoire de la machine asynchrone peut être menée grâce à des accéléromètres placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales. Les vibrations de la machine fournissent des informations sur pratiquement tous les défauts fréquemment

rencontrés, notamment ceux mécaniques [27]. Cependant, ces analyses vibratoires comportent certains inconvénients : [29]

- Problème d'accessibilité
- Difficultés rencontrées dans les connexions mécaniques des accéléromètres pour effectuer les mesures nécessaires au voisinage direct du défaut

De plus, le coût de ces capteurs reste relativement élevé par rapport aux autres capteurs tels que les capteurs de vitesse ou de courant.

Pour s'affranchir de ces problèmes, les recherches focalisent leurs efforts pour détecter et localiser les défauts par l'analyse d'autres signaux.

I.11.4. Analyse des flux

La conversion électromécanique de l'énergie est localisée dans l'entrefer. Cette conversion est donc affectée par tout déséquilibre magnétique, mécanique, électrique ou électromagnétique au rotor ou au stator. Le flux d'entrefer, le flux embrassé dans les enroulements statoriques ou encore le flux de fuite dans l'axe du rotor sont des paramètres qui, à cause de leur sensibilité à tout déséquilibre de la machine, méritent d'être analysés. [28]

Ces grandeurs sont difficilement mesurables mais des études ont été menées pour extraire des signatures spécifiques à certains défauts. L'étude des variations de flux peut donc être une solution pour détecter et localiser un défaut à travers de l'utilisation de bobines exploratrices placées à l'extérieur de la machine, perpendiculairement à l'axe du rotor. [26]

I.11.5. Analyse du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état du moteur. [30]

I.12. Techniques de traitement de signal utilisées dans le diagnostic

Puisque les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'informations, on est obligé d'aller vers les techniques de traitement de signal. Plusieurs techniques de traitement de signal ont été utilisées depuis longtemps pour analyser le contenu spectral des différents signaux

issus des machines électriques tels que : les courants, les puissances, le couple, la vitesse, le flux, les vibrations,...etc. Dans ce que suit, on présente brièvement les transformées de Fourier rapide (TFR), Fourier à fenêtre glissante (TFFG) et la transformée en ondelettes (TO).

I.12.1. Transformée de Fourier Rapide (TFR)

La transformée de Fourier rapide (TFR) est une technique largement utilisée pour la détection des défauts dans les machines asynchrones. Elle donne de bons résultats pour des fonctionnements à forte puissance ou à couple constant mais des difficultés apparaissent pour les fonctionnements à couple de charge, vitesse de rotation et tensions d'alimentation variables. La nécessité de trouver d'autres techniques de traitement de signal pour les signaux non stationnaires devient donc nécessaire. [31]

I.12.2. Transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG)

Pour pallier le manque d'information sur le temps dans la transformée de Fourier, la TFFG est donc introduite. Cette méthode, pouvant être adaptée aux signaux non stationnaires, est très proche de l'analyse de Fourier classique. Son principe est de définir une fenêtre qui sera utilisée comme masque sur le signal, dans laquelle on considère que le signal est localement stationnaire, puis on décale cette fenêtre le long du signal afin de l'analyser entièrement. [26]

I.12.3. Transformée en ondelettes (TO)

La transformée en ondelettes est un outil récent de traitement de signal. Son principe repose sur la décomposition d'un signal dans une base de fonctions particulières. De ce point de vue, elle est tout à fait comparable à l'analyse de Fourier. Cependant, les ondelettes sont des fonctions oscillantes au sens large, rapidement amorties, contrairement aux fonctions sinusoïdales de l'analyse de Fourier. Par ailleurs, les ondelettes possèdent la propriété de pouvoir être bien localisées en temps ou en fréquence, ce qui les différencie principalement de l'analyse temps-fréquence classique. Plusieurs travaux utilisent la TO pour le diagnostic de défauts dans les machines asynchrone triphasée à cage. [26]

I.13. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons montré des généralités sur les machines asynchrones (Définition, avantages et les inconvénients, principe de fonctionnement, caractéristique...), en plus on a montré le diagramme de bilan de puissance d'une machine asynchrone. Et nous

sommes intéressés ensuite à synthétiser les défauts qui se produisent de manière intempestive au niveau de la machine. Et nous avons montré les références techniques de traitement de signal utilisées dans le diagnostic.

Dans le chapitre suivant nous présentons les formulations mathématiques des phénomènes électromagnétiques.

Chapitre -II-

Formulation mathématiques des
phénomènes électromagnétiques

II.1.Introduction

Les phénomènes électromagnétiques que l'on étudie au sein de la machine asynchrone sont régis par les équations de Maxwell et les équations caractéristiques de milieu étudié. Ces équations sont de vieux concepts de la physique. Dans ce chapitre, nous allons exposer les modèles mathématique qui caractérise l'évolution spatiaux-temporelle du champ électromagnétique dans la machine asynchrone

II.2.Les équations de maxwell

La découverte expérimentale des phénomènes d induction électromagnétique et l'hypothèse du courant de déplacement de maxwell ont permis à celui-ci de donner une formulation générale des loi de l'électromagnétisme sous la forme du groupe d'équations connues sous le nom d'équations de maxwell : [10]

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

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{H} = \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} + \vec{J}_c \quad (\text{Lois d'Ampère}) \quad (\text{II.2})$$

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (\text{Lois de la conservation}) \quad (\text{II.3})$$

$$\text{div}\vec{D} = \rho \quad (\text{Théorème de Gauss}) \quad (\text{II.4})$$

Tels que :

\vec{H} : Vecteur champ magnétique [A/m].

\vec{E} : Vecteur champ électrique [V/m].

\vec{B} : Vecteur induction magnétique [T].

\vec{D} : Vecteur induction électrique (vecteur déplacement électrique) [C/m²].

\vec{J}_c : Vecteur densité du courant électrique de conduction [A/m²].

$\vec{J}_D = \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}$: Densité des courants de déplacement négligeable à basse fréquence [A/m²].

II.2.1. Equation de Maxwell-Faraday

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.5})$$

Cette équation exprime le couplage électrique magnétique en régime dynamique où la variation temporelle de \vec{B} détermine le $\overrightarrow{\text{rot}}\vec{E}$

Démonstration :

La force électromotrice induite dans un circuit (c) placé dans un champ magnétique est déterminée par l'intégrale curviligne suivante :

$$e = \oint \vec{E} \cdot \overrightarrow{dl} \quad (\text{II.6})$$

Ou (c) est une boucle fermée De la même manière, une (f e m) est aussi induite, si le flux Φ varie dans le temps à travers un circuit fixe tel que : [11]

$$e = \frac{-d\Phi}{dt} \quad (\text{II.7})$$

Ou : $\varphi = (x, y, z, t)$

Donc : $e = \frac{-d\Phi}{dt} = -\frac{\partial}{\partial t} \int \vec{B} \cdot \overrightarrow{ds}$ (II.8)

Ou (s) est une surface s'appuyant sur le contour (c) Et d'après le théorème de STOKES on a :

$$\oint \vec{E} \cdot \overrightarrow{dl} = \int \overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} \cdot \overrightarrow{ds} \quad (\text{II.9})$$

On obtient donc :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \vec{B} \cdot \overrightarrow{ds} = \int \overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} \cdot \overrightarrow{ds} \quad (\text{II.10})$$

Ainsi nous aurons :

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

II.2.2. Equation de Maxwell-Ampère

L'équation de maxwell-Ampère exprime la dépendance du champ magnétique de la densité de courant totale (conduction + déplacement) Démonstration : [11]

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{H} = \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} + \vec{J}_c \quad (\text{II.12})$$

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint \vec{j} \cdot d\vec{s} \quad (\text{II.13})$$

(s) : est la surface qui s'appuie sur le courant (c)

J : est la densité de courant.

D'après le théorème de STOKES nous avons :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint \text{rot} \vec{H} \cdot d\vec{s} \quad (\text{II.14})$$

$$\text{Donc :} \quad \oint \text{rot} \vec{H} \cdot d\vec{s} = \oint \vec{j} \cdot d\vec{s} \quad (\text{II.15})$$

$$\text{D'où :} \quad \text{rot} \vec{H} = \vec{j} \quad (\text{II.16})$$

II.2.3. Equations de conservations

Divergence de l'induction magnétique

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II.17})$$

Cette relation traduit mathématiquement, qu'il n'existe pas de charges magnétiques car les seules sources de champ magnétique sont les courants électriques. C'est pourquoi les lignes du champ sont toujours fermées sur elles-mêmes, elles forment des boucles. ces boucles n'ont; ni points de départs, ni points d'arrivées, ni points de convergences, D'où, la nomination d'induction conservative (champ conservatif). [11]

II.2.4. Théorème de GAUSS

Si on considère une surface (s) fermée, le flux de vecteur de déplacement électrique \vec{D} Sortant de cette surface est égal à la charge totale contenue à l'intérieur de cette dernière

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{II.18})$$

$$\oint \vec{D} \cdot d\vec{s} = \oint \rho \, dv \quad (\text{II.19})$$

D'après le théorème d'OSTROGRADSKI –GREEN nous avons

$$\oint \vec{D} \cdot d\vec{s} = \oint \text{div} \vec{D} \, dv \quad (\text{II.20})$$

D'où :

$$\oint \text{div} \vec{D} \, dv = \oint \vec{D} \cdot d\vec{s} \quad (\text{II.21})$$

Ainsi

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho$$

II.3.Loi de comportement des matériaux (milieux physiques)

Au système d'équations de Maxwell il fallait introduire des relations traduisant le comportement physique du milieu. [07]

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \text{ Ou } \vec{H} = \nu \cdot \vec{B} \quad (\text{II.22})$$

$$\vec{D} = \vec{E} \cdot \epsilon \quad (\text{II.23})$$

II.3.1. Induction électrique et champ électrique

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{II.24})$$

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (\text{II.25})$$

ϵ_r : Permittivité relative du milieu [U S I]

ϵ_0 : Permittivité absolue du vide [F / m]

Cette équation décrit la relation entre le vecteur induction électrique \vec{D} et le champ électrique \vec{E} , elle est linéaire si ϵ est constante dans le cas des conducteurs non polarisés nous avons :

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36 \pi 10^9} [F/M] \quad (\text{II.26})$$

La détermination \vec{D} de l'équation (II.23) et de $\operatorname{rot} \vec{E}$ détermine complètement \vec{E}

II.3.2. Induction magnétique et champ magnétique

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.27})$$

C'est la relation entre le champ magnétique et l'induction magnétique. Cette dernière donne la courbe d'aimantation

$$\vec{B} = f(\vec{H}) \quad (\text{II.28})$$

Cette variation de \vec{H} conduit à une variation de l'induction \vec{B} , on trouve par la suite le cycle d'hystérésis dont la forme se différencie d'un matériau à un autre, donc d'un dispositif électrotechnique à un autre. [11]

Dans le cas d'un aimant permanent, nous avons:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} + \vec{B}_{re} \quad (\text{II.29})$$

\vec{B}_{re} : Vecteur induction magnétique rémanente

II.4. Les modèles électromagnétique

Les équations qui décrivent le couplage électromagnétique entre effets magnétiques et les effets électriques peuvent être dans certains cas découplés en donnant naissance à des modèles plus simples. [13]

Les modèles en électromagnétiques sont :

- Le Modèle Electrostatique
- Le Modèle Electrocinétique
- Le Modèle Magnétostatique (scalaire, vectorielle)
- Le Modèle Magnétodynamique

II.4.1. Le Modèle Electrostatique

La source du champ électrostatique est constituée par des charges fixes dans le référentiel d'étude. Les équations correspondantes sont : [13]

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = 0 \quad (\text{II.30})$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{II.31})$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{II.32})$$

La relation (IV.1) permet de définir une fonction potentiel scalaire électrique V, ou tension électrique, telle que :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V \quad (\text{II.33})$$

Le modèle se ramène alors à l'équation :

$$\text{div} (\epsilon \overrightarrow{\text{grad}} V) + \rho = 0 \quad (\text{II.34})$$

ρ : Densité volumique de charge électriques [C/m]

II.4.2. Le Modèle Electrocinétique

Il est utilisable lorsque l'on veut étudier la répartition du courant électrique dans des Conducteurs isolés soumis à des différences de potentiel continues. [13]

Le modèle est défini par les équations suivantes :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = \vec{0} \quad (\text{II.35})$$

$$\text{div} \vec{J} = 0 \quad (\text{II.36})$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.37})$$

L'équation (II.35) implique qu'il existe un potentiel électrique scalaire V tel que :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{Grad}} V \quad (\text{II.38})$$

Ce potentiel est appelé la tension électrique, on aura donc à résoudre :

$$\text{div}(\sigma \overrightarrow{\text{grad}} V) = 0 \quad (\text{II.39})$$

II.4.3. Le Modèle Magnétostatique

II.4.3.1. Le modèle Magnétostatique scalaire

Dans ce modèle, on suppose que les courants électriques soient nuls dans la pièce à étudier et que les champs ne dépendent pas du temps, on obtient alors les relations suivantes : [13]

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = 0 \quad \text{car les courants sont nul} \quad (\text{II.40})$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad \text{conservation du champ} \quad (\text{II.41})$$

C'est le cas des dispositifs pour lesquels les champs sont créés par des forces magnétomotrices extérieures et indépendantes du dispositif étudié, ou bien par l'effet d'aimants permanents pour lesquels on a la loi : [13]

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II.42})$$

La relation (II.40), implique qu'il existe une fonction Φ , potentiel scalaire magnétique telle que :

$$\vec{H} = \overrightarrow{\text{Grad}} \Phi \quad (\text{II.43})$$

On obtient alors :

$$\text{div}(\mu \overrightarrow{\text{grad}} \Phi) = \text{div} \vec{B}_r \quad (\text{II.44})$$

II.4.3.2. Le Modèle Magnétostatique vectorielle

Comme dans le modèle précédent, on suppose que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps, le terme $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ est nul et les champs électrique \vec{E} et magnétique \vec{B} sont découplés, par contre on désire modéliser un objet parcouru par des courants non nuls, on obtient alors les équations suivantes: [11]

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J} \quad (\text{II.45})$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II.46})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II.47})$$

L'équation (II.46), permet de définir une fonction vectorielle \vec{A} appelée potentiel vecteur Magnétique telle que l'on a : [11]

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \quad (\text{II.48})$$

Pour que \vec{A} soit totalement défini, on doit fixer sa divergence en utilisant la jauge de coulomb :

$$\text{div} \vec{A} = 0 \quad (\text{II.49})$$

D'après les équations (II.45), (II.47), (II.48), on obtient :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \right) = \vec{J} + \overrightarrow{\text{rot}} \left(\frac{1}{\mu} \vec{B}_r \right) \quad (\text{II.50})$$

Dans les problèmes bidimensionnels (système suffisamment long ou à symétrie axiale), le potentiel vecteur magnétique se réduit à une seule composante, ce qui rend ce modèle attrayant pour la résolution de tels problèmes. [13]

II.4.4. Le Modèle Magnétodynamique

Ce modèle s'applique aux dispositifs électromagnétiques dans lesquels les sources de courant ou de tension varient dans le temps. C'est à dire que le terme $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ n'est pas nul, les champs électriques et magnétiques sont alors couplés par la présence des courants induits.

Ecrivons les deux équations de Maxwell qui se présentent sans terme source : [13]

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.51})$$

$$\text{div} \vec{B} = \vec{0} \quad (\text{II.52})$$

La deuxième équation indique que \vec{B} est un champ de rotationnel. Ceci implique qu'il existe un vecteur \vec{A} , tel que: [13]

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \quad (\text{II.53})$$

Ce vecteur \vec{A} est appelé le potentiel vecteur magnétique

La substitution de (II.53) dans (II.51) donne :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = \vec{0} \quad (\text{II.54})$$

Ceci nous permet de constater que le champ $\left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right)$ est un champ conservatif, il vient alors que:

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\overrightarrow{\text{grad}} V \quad (\text{II.55})$$

Soit:

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{II.56})$$


V est le potentiel électrique scalaire du champ électromagnétique; on remarque qu'en régime variable, l'expression de \vec{E} dépend à la fois de V et de \vec{A}

D'après l'équation:

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J}_t \quad (\text{II.57})$$

Or
$$\vec{J}_t = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} + \sigma (\vec{u} \wedge \vec{B}) \quad (\text{II.58})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} + \sigma (\vec{u} \wedge \vec{B}) \quad (\text{II.59})$$


$$\overrightarrow{\text{rot}} (\overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) = -\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \sigma \overrightarrow{\text{grad}} V + \vec{J}_s \quad (\text{II.60})$$

Pour que la solution soit unique, on doit fixer la divergence de \vec{A}

On obtient:

$$\begin{cases} \overrightarrow{\text{rot}} (\nu \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) = -\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \sigma \overrightarrow{\text{grad}} V + \vec{J}_s - \sigma (\vec{u} \wedge \vec{B}) & \text{(II.61)} \\ \text{div} \vec{A} = 0 & \text{(II.62)} \end{cases}$$

Dans le cas où les courants induits par mouvement sont nuls et aussi le $\overrightarrow{\text{grad}} V$ en axisymétrique est nul, l'équation du système devient:

$$\overrightarrow{\text{rot}} (\nu \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_s \quad \text{(II.63)}$$

L'utilisation de ce modèle est très répandue dans l'étude des machines électriques des dispositifs du chauffage par induction, des transformateurs, ...etc. [13]

II.5. Condition aux limites

Généralement, on rencontre deux types de conditions aux limites:

➔ Condition de type Dirichlet :

La fonction inconnue doit être spécifiée sur les limites : [12]

$$\vec{A} = \vec{0} \quad \text{(Condition de Dirichlet homogène)}$$

$$\vec{A} \neq \vec{0} \quad \text{(Condition de Dirichlet non homogène)}$$

➔ Condition de type Neumann :

Elle exprime la variation de la fonction inconnue à une surface : [12]

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial \vec{n}} = 0 \quad \text{(Condition de Neumann homogène)}$$

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial \vec{n}} \neq 0 \quad \text{(Condition de Neumann non homogène)}$$

\vec{n} : est la normale (exprime la nullité ou la constance de la dérivée normale à la frontière)

II.6. Conclusion

Nous sommes intéressés, dans ce chapitre à la formulation mathématique des équations de Maxwell qui décrivent tout les phénomènes électromagnétiques que l'on veut généralement étudier en électrotechnique tel que les moteurs asynchrone qui représente l'objectif de notre travail

La résolution des équations électromagnétiques par la méthode des éléments finis on utilisant le logiciel COMSOL-Multiphysics sera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre -III-

Méthodes numériques et logiciel

COMSOL - Multipysics

III.1.Introduction

Le développement des méthodes numériques (différences finies, volumes finis, éléments finis, intégrales de frontière, etc.) est heureusement accompagné par les avancées du matériel informatique. Des programmes qui nécessitaient autrefois des calculateurs complexes et onéreux tournent à présent sur les PC d'un coût modeste. Cela a contribué à faciliter la mise au point de logiciels. [14]

III.2.Différentes techniques de résolution des équations aux dérivées partielles

Les principales méthodes de résolution des EDPs sont : la méthode des différences finies(MDF), la méthode des éléments finis(MEF), la méthode des volumes finis(MVF), la méthode des intégrales de frontières(MIF), la méthode des circuits couplés(MCC). [13]

L'utilisation des méthodes numériques de discrétisation consiste à ramener la résolution du système d'équations différentielles dans le domaine d'étude, compte tenu des conditions aux limites, à celle d'un système d'équation algébriques dont la solution conduit à la détermination des champs électromagnétiques et du déplacement. [13]

III.2.1.Méthode des Différences Finis (MDF)

C'est une méthode basée sur le théorème de Taylor où l'on remplace l'opérateur différentiel par un opérateur aux différences. Le domaine d'étude est découpé au moyen d'une grille carrée dans le cas bidimensionnel et une grille cubique dans le cas tridimensionnel, l'équation à résoudre est écrite pour chaque point ou nœud de maillage, pour cela on aura un système d'équations possédant un nombre d'équations égal au nombre de nœuds. [13]

La figure (III.1) représente un exemple de maillage pour le cas bidimensionnel.

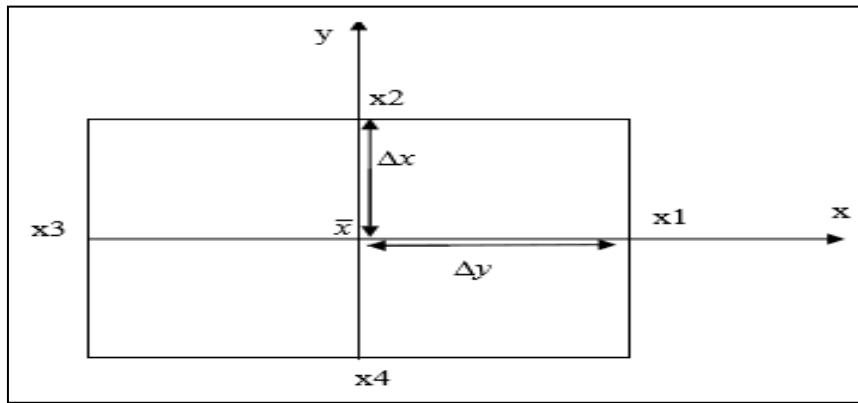


Figure.III.1. Configuration géométrique en 2D.

Où \bar{x} est le point d'évaluation et x_1 , x_2 , x_3 et x_4 étant les nœuds du maillage

La méthode des différences finies est très simple à mettre en œuvre, mais elle peut ne pas être précise puisqu'elle prend le développement en série de Taylor de l'inconnue jusqu'au troisième terme seulement.

C'est une méthode qui est difficilement applicable aux domaines à géométrie compliquée, elle est plutôt réservée aux domaines à géométrie simple et aux frontières régulières tels que les carrés et les rectangles [15].

III.2.2.Méthode des volumes finis (MVF)

La (MVF) se déduit à partir de la (MDF), le domaine d'étude (Ω) est subdivisé en volumes élémentaires de telle manière que chaque volume entoure un nœud de maillage (celui des différences finis).

Cette méthode a connu un progrès important non seulement pour la modélisation en mécanique des fluides, mais aussi pour la modélisation d'autres branches de l'ingénierie scientifique : électromagnétisme, transfert thermique...etc. [16]

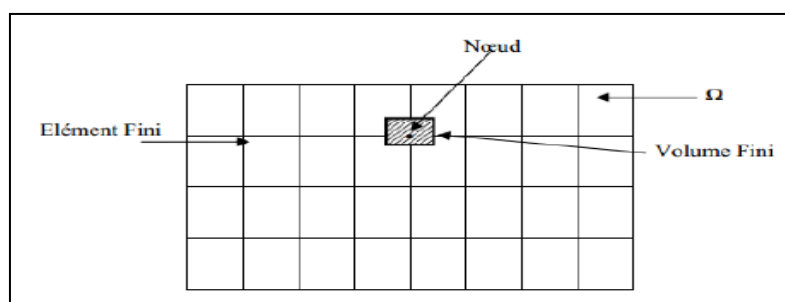


Figure.III.2. Maillage du domaine d'étude.

L'équation différentielle est projetée sur une fonction de projection bien déterminée et ensuite intégrée dans chacun des volumes élémentaires. Pour calculer l'intégrale dans le volume élémentaire, la fonction inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, puissance, exponentielle,...etc.) entre deux nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude

L'équation discrétisée de cette façon exprime le principe de conservation pour l'inconnu dans l'élément de volume et la solution obtenue est constituée uniquement par les valeurs nodales. [17]

Cette méthode est utilisée, en particulier en mécanique des fluides (l'équation d'écoulement), où elle est apparue depuis une vingtaine d'années, sa procédure donne une solution plus précise que celle fournie par la MDF. [17]

III.2.3.Méthode de circuits couples (MCC)

La MCC permet de fournir la solution d'une EDP par une expression intégrale du type loi de BIOT et SAVARD. Dans ce cas, on associe à la forme intégrale de la solution, une subdivision de l'inducteur en spires élémentaires.

En appliquant les lois de KIRCHOFF à ces circuits élémentaires, on aboutit à un système d'équations algébriques dont la solution conduit à la distribution des densités du courant. La MCC peut être couplée à une méthode numérique de discrétisation type MEF ou MDF de la charge. [12]

III.2.4.Méthode intégrale de frontière (MIF)

Lorsqu'on utilise la MDF ou la MEF, on calcule les variables inconnues dans tout le domaine. La MIF permet de ramener le maillage à la frontière du domaine. Ainsi, le calcul des valeurs de l'inconnue sur les frontières du domaine suffit pour obtenir la solution en tout point du domaine. Pour ramener le problème sur les frontières, la MIF utilise le théorème d'Ostrogradski- Green. Cette méthode peut être intéressante pour l'étude de structure tridimensionnelle ou lorsque l'air ou les milieux passifs occupent une grande partie du domaine d'étude. Cependant, cette méthode a l'inconvénient de conduire à un système

algébrique à matrice pleine (pas de termes nuls). Ceci augmente le temps utilisateur, donc le coût de calcul. [18]

III.2.5.Méthode des éléments finis (MEF)

Historiquement les premiers développements de la méthode des éléments finis ont été proposés par Richard Courant dans les années 1940, mais ce sont les mécaniciens qui ont développé, popularisé et démontré l'efficacité de cette méthode dans les années 1940-1960.

En 1970, Silvester et son équipe de l'université MC Gill à Montréal se sont intéressés à l'adaptation de cette méthode de résolution des problèmes elliptiques à l'Electrotechnique. [19]

La méthode des éléments finis est fréquemment utilisée pour modéliser précisément et finement des systèmes électrotechniques. Cette méthode permet de tenir compte de la géométrie de la machine et permet une approche systématique des problèmes magnétiques. [20]

De plus, un couplage entre les grandeurs électriques, mécaniques, et magnétiques peut être réalisé. Les éléments finis permettent également une étude tridimensionnelle, ce qui apporte une très grande finesse dans la connaissance du système. [21]

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes numériques les plus utilisées actuellement pour résoudre d'une manière efficace les équations différentielles aux dérivées partielles des problèmes physiques. [21]

III.2.5.1.Principe de la méthode des éléments finis

L'analyse aux éléments finis (MEF) est une méthode de calcul utilisée dans les domaines scientifique et technique. Avec les éléments finis, il est possible de calculer des problèmes complexes qui ne peuvent pas être résolus par d'autres méthodes.

La méthode des éléments finis (MEF) étant une analyse numérique consistant à résoudre des équations différentielles, il est possible de l'utiliser dans divers domaines physiques. Le composant à analyser est subdivisé en un grand nombre de petits éléments finis avec une

géométrie simple, qui peuvent être calculés avec les équations initiales connues. Cette subdivision a donné le nom de la méthode numérique: méthode des éléments finis. [01]

En ingénierie, la méthode des éléments finis est aujourd'hui une méthode standard dans le calcul assisté par ordinateur des charpentes et structures planes.

Cette méthode est basée sur la résolution numérique des équations de Maxwell. Les informations fournies par ce type de simulation sont d'une grande précision et elles nous apportent la prise en compte de la géométrie de la machine, la saturation des matériaux magnétiques, ainsi que l'effet de peau dans les barres rotoriques, lorsque le problème est correctement posé (géométrie, physique, lien avec les équations de circuit...) et que l'on utilise le mode de résolution adéquate (magnétostatique, magnétodynamique, magnétique évolutif). D'autre part, d'un point de la machine (fréquence et flux magnétisant), en modifiant, directement, les paramètres dans le programme du calcul (Logiciel) d'où une grande souplesse d'utilisation. [01]

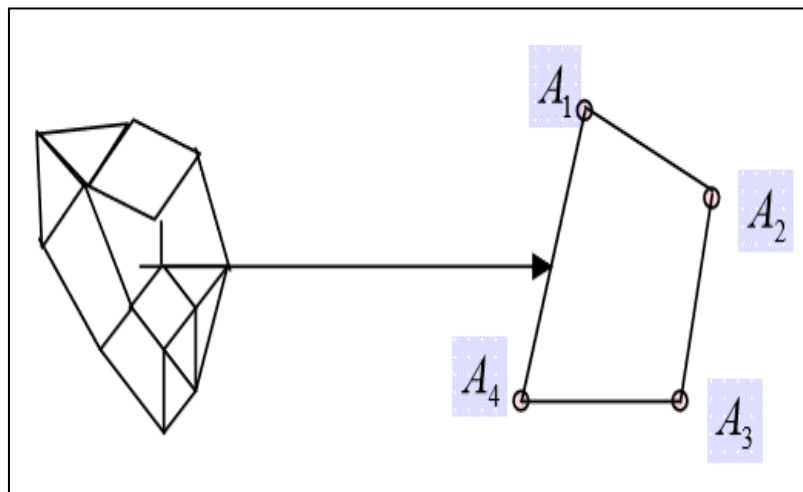


Figure.III.3.Elément de calcul. [14]

III.2.5.2.Démarche éléments finis

Voici les principales étapes de la construction d'un modèle éléments finis :

- Discrétisation du milieu continu en sous domaines.
- Construction de l'approximation nodale par sous domaine.
- Calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème.

- Assemblage des matrices élémentaires.
- prise en compte des conditions aux limites.
- résolution du système d'équations

III.2.5.3. Discrétisation du domaine (maillage)

Le domaine de résolution est discrétisé en sous domaine. Ces éléments dans l'analyse en éléments finis sont les briques élémentaires dont le maillage va représenter le système géométrique à simuler. Les éléments sont des représentations géométriques composant plusieurs nœuds, la figure 4 représente des exemples classiques à 1D, 2D, et 3D qu'on rencontre généralement dans le maillage éléments finis. [14]

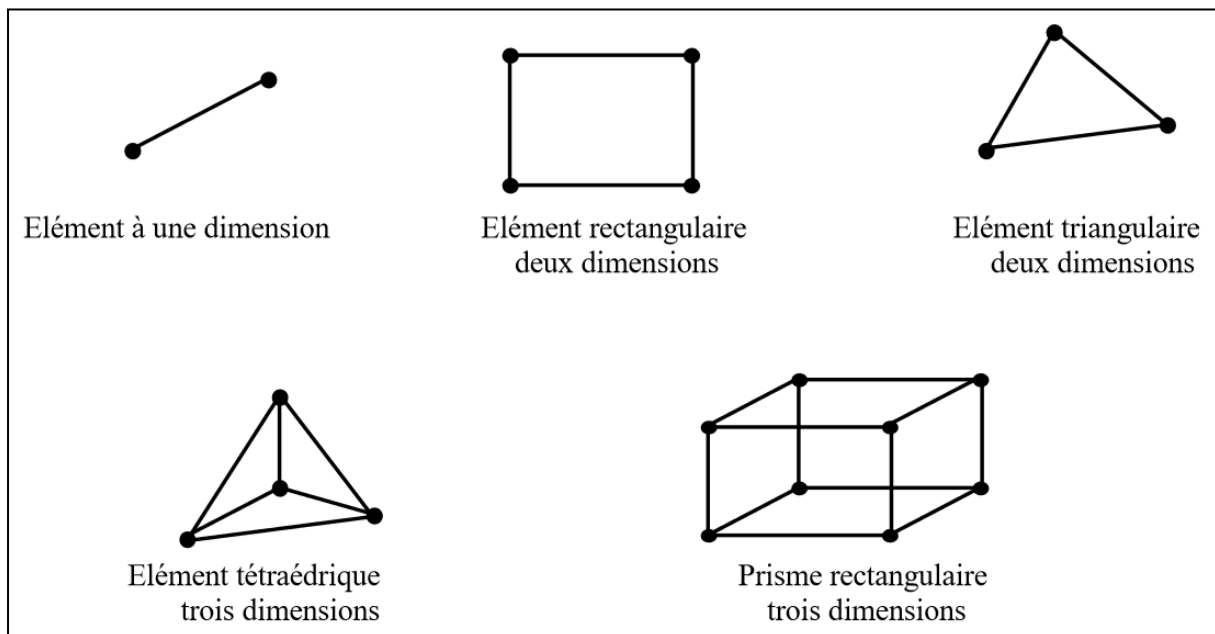


Figure.III.4.Exemples d'éléments d'un maillage éléments fini. [14]

III.2.5.4. Les avantages et les inconvénients de la méthode des éléments finis

A- Les avantages

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

B- Les inconvénients

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

III.2.5.5. Logiciels utilisant les éléments finis

Parmi les Logiciels utilisant éléments finis on peut citer : [22]

- ABAQUS
- ANSYS
- CAST3M
- ASTER
- COMSOL-MULTIPHYSICS
- CosmosWorks
- Dytran
- EuroPlexus
- Flux2D/ 3D

Tous ces logiciels sont performants et adaptables aux différents problèmes rencontrés en physique. Pour la Modélisation des phénomènes électromagnétique et mécanique du moteur asynchrone, on a choisi "Comsol-Multiphysics" à cause de sa rapidité d'exécution

III.3. Présentation de COMSOL «Multiphysics»

COMSOL-Multiphysics, anciennement appelé FEMLab, est un logiciel de simulation qui permet de résoudre des systèmes d'équations différentielles partielles en utilisant la méthode des éléments finis en une, deux et trois dimensions. Il peut relever les défis du domaine de l'électromagnétisme, l'élasticité dynamique des fluides et la dynamique des gaz. Femlab permet également de résoudre le problème comme une formulation mathématique (sous la forme d'équations) et physiques (le choix des modèles physiques, tels que les processus de diffusion). Dans le mode dit physique, on peut aussi utiliser les équations pré-définies pour la

majorité des phénomènes qui ont lieu dans les sciences et la technologie, tels que le transfert de chaleur et d'électricité, la théorie de l'élasticité, la propagation des ondes de diffusion, l'écoulement du fluide... [14]

Dans notre travail nous utilisons La version 5.3a Elle se distingue, entre autres, par le support généralisé pour les fichiers de géométrie au format Parasolid, une nouvelle interface bidirectionnelle et des moteurs de calcul plus rapides par rapport aux versions précédentes. L'exécution des modèles d'écoulement de grande taille dans Multiphysics 5.3a est par exemple trois fois plus rapide que dans la version précédente et les simulations temporelles sont jusqu'à quatre fois plus rapides avec le nouveau solveur temporel. On trouve également désormais un mailleur plus avancé. De front qui assure la création de maillages 2D et 3D de qualité....



Figure.III.5.Photo montrant l'interface d'ouverture du programme avec le logo dessus

III.3.1.Prise en main du logiciel

Le processus de modélisation et de simulation numérique sous Comsol-Multiphysics implique plusieurs étapes : [23]

- ❖ La définition globale des paramètres et des variables liées au modèle.
- ❖ La définition de sa géométrie.

- ❖ La prise en compte des différents phénomènes physiques qui peuvent exister dans le problème considéré.
- ❖ La résolution du problème à l'aide d'un des différents solveurs.
- ❖ La visualisation des résultats.

III.3.2.Étapes de résolution dans COMSOL Multiphysics

III.3.2.1.L'interface graphique de COMSOL

Au démarrage du logiciel, le navigateur de modèle apparaît. C'est lui que permettra de spécifier le ou les modèles physique qui seront utilisés. C'est aussi ici que la dimension de l'espace est choisie. Pour chacun des modèles, il est précisé quelles sont les variables propres à ce modèle. (Figure 6)

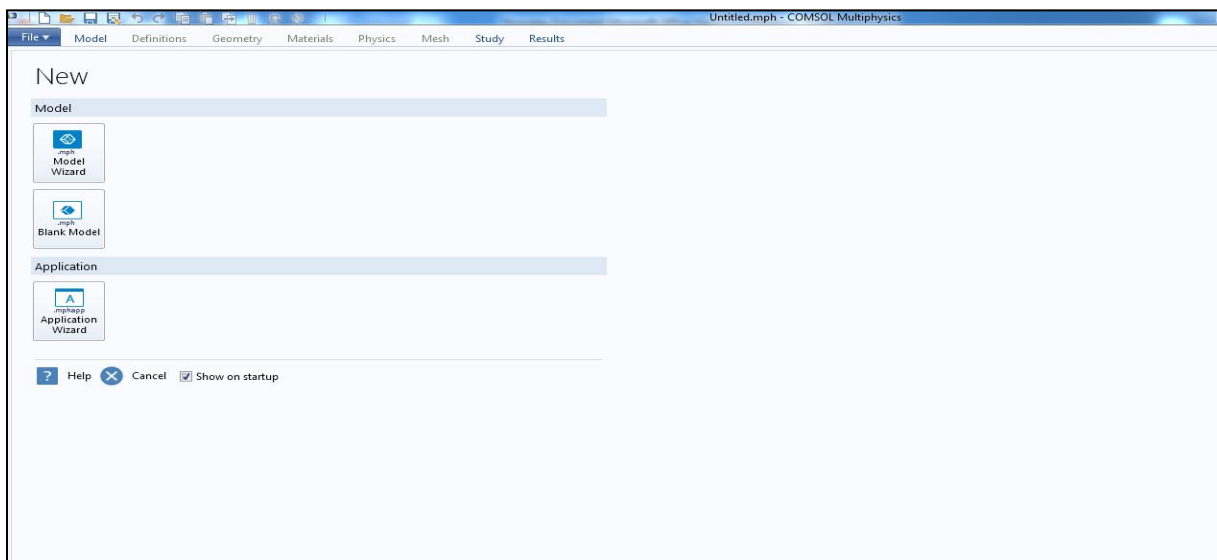


Figure.III.6.Fenêtre de démarrage du logiciel

III.3.2.2.Choix du modèle

Nous allons commencer par le choix du modèle. Lancez donc le module magnétodynamique dans le navigateur de modèle. Nous étudions un problème en 2D

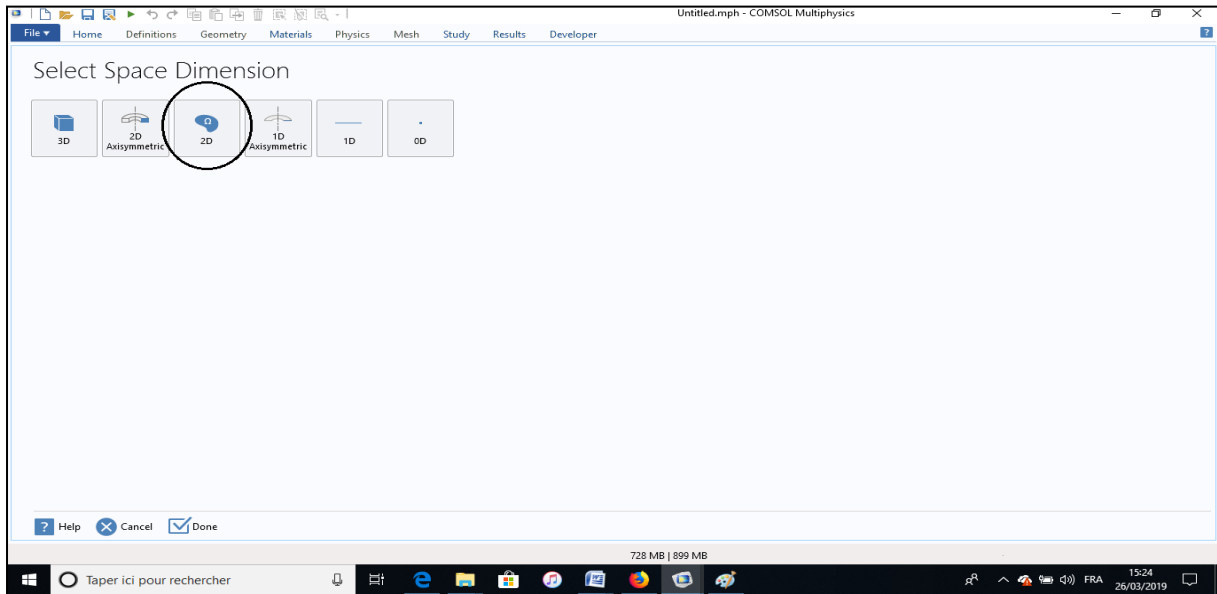


Figure.III.7.Les dimensions de l'espace en Comsol Multiphysics

III.3.2.3.Choix du modèle Physique

Vous devez par la suite choisir le modèle physique approprié. Sélectionnez le modèle **Rotating machinery,Magnetic(rmm)** dans la catégorie **AC\DC**. Cliquez sur **Add**

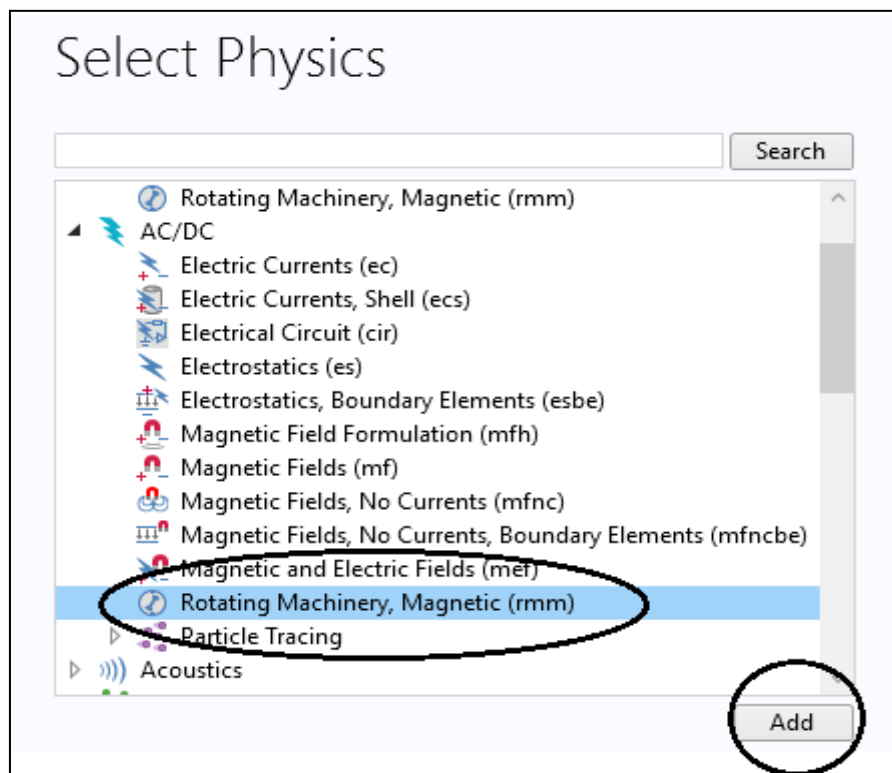
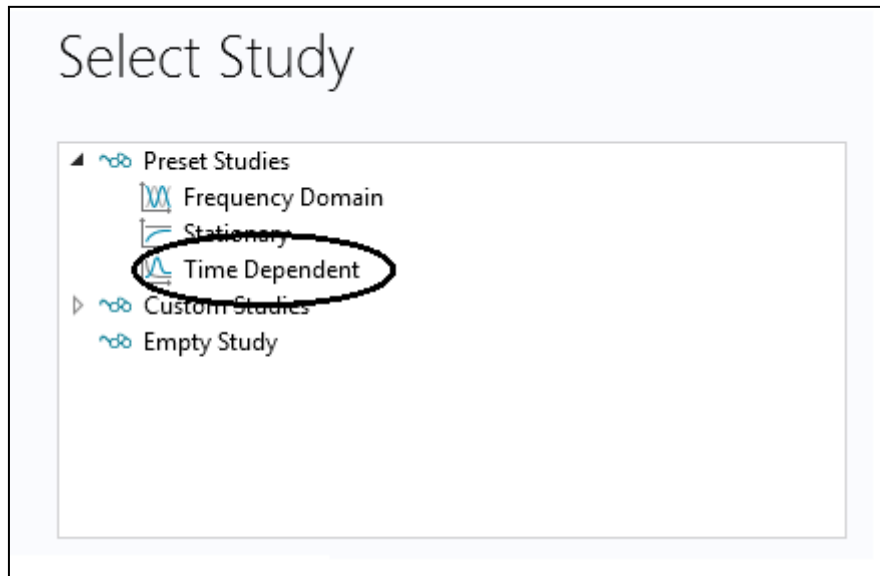


Figure.III.8.les choix du modèle physique

III.3.2.4. Le type d'étude

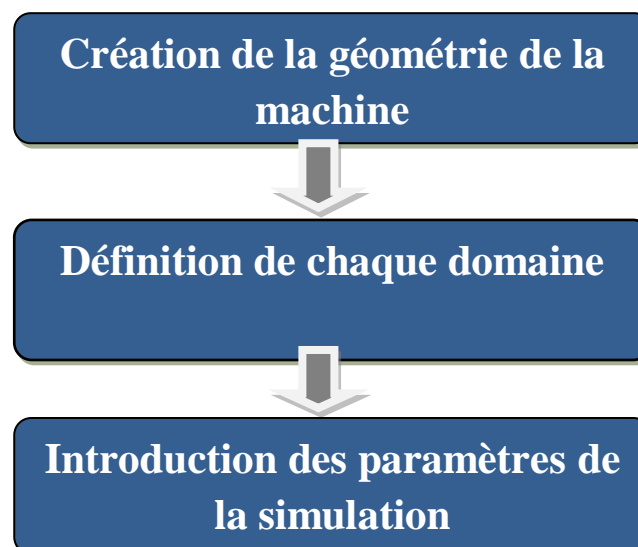
Après avoir sélectionné le modèle, vous devez sélectionner le type d'étude désiré. Sous Preset Studies, choisissez le cas d'étude en régime permanent (Time Dependent), puis cliquez sur <Done>



III.3.2.5. Méthodologie de conception avec COMSOL-Multiphysics

Dans notre projet on va passer étape par étape commençant par la création de la géométrie du modèle à concevoir. Après avoir dessiné notre modèle on doit définir les propriétés physiques et les caractéristiques de chaque matériau utilisé dans la construction des Asynchrone. Les conditions aux limites et les paramètres du modèle sont précisés.

La modélisation avec COMSOL Multiphysics se résume en 5 étapes :



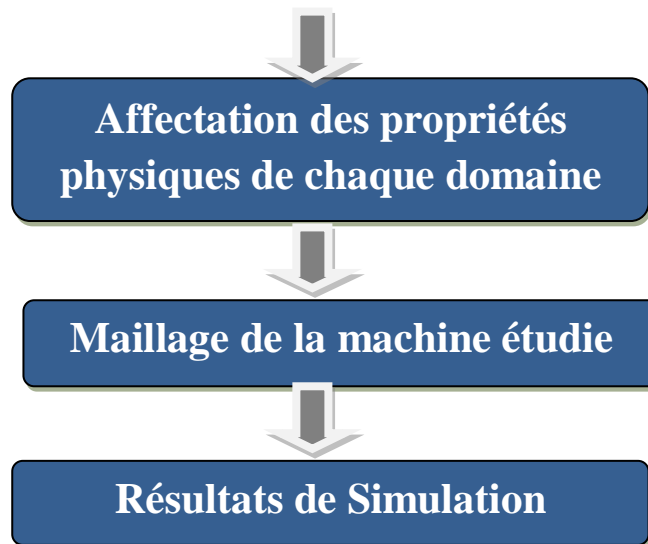


Figure.III.9.Diagramme des étapes de conception avec COMSOL

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes techniques de résolution des équations aux dérivées partielles. Ensuite, nous avons donné une introduction sur le logiciel COMSOL Multiphysics. Par ailleurs, le prochain chapitre sera consacré à la modélisation de la machine asynchrone et les résultats de simulation obtenus par ce logiciel.

Chapitre -IV-

Applications et résultats
de simulation

IV.1.Introduction

Le chapitre suivant a pour objectif d'étudier le défaut de cassure de barre dans une machine asynchrone triphasé à cage avec la variation de la résistance d'une barre pour différents charges mécaniques. Les résultats de simulations à caractère magnétique et mécanique seront largement présentés. Ces résultats sont obtenus à partir du logiciel COMSOL-Multiphysics. Dans ce contexte, nous avons proposé d'étudier le défaut de cassure de barre pour trois applications. La première est la modélisation une machine asynchrone à l'état sein, la deuxième avec un défaut de cassure de barre et la troisième avec deux barres casses. La simulation en régime magnétodynamique permis d'étudier l'influence des défauts sur la distribution des lignes de champs et l'induction magnétique de la machine, ainsi que le couple électromagnétique dans l'entrefer. Les cassures des barres sont les défauts les plus fréquents au rotor. Leurs simulations permettent d'identifier les signatures de ces défauts et de prévoir les détériorations générées dans la machine.

IV.2.Description du système

On va modéliser une application constituée d'une machine asynchrone à deux pôles avec 36 encoches au stator et 28 barres d'aluminium au rotor pour une fréquence d'alimentation $f=60\text{Hz}$. Le problème que nous allons étudier consiste à la résolution de l'équation du modèle magnétodynamique et l'équation mécanique dans une configuration en bidimensionnelle. L'application traitée est une machine asynchrone. Les dimensions de cette machine sont données dans le tableau. IV. 1 et la géométrie est illustré dans la figure IV.1.

L'équation du mouvement de la machine est donnée par les équations IV. 1 et IV. 2. Pour résoudre ces équations nous utilisons deux options qui offrent l'interface de logiciel COMSOL, il s'agit de 'ODE global' (Ordinary differential equations) et 'DAE' (Differential algebraic equations). Ces deux options sont basées sur la méthode des éléments finis comme une méthode de résolution des équations aux dérivées partielles. Cependant, cette méthode est sensible à la taille du maillage. Il est nécessaire de raffiné le maillage éventuellement dans l'entrefer pour aboutir des résultats précises.

$$\frac{dWm}{dt} = \frac{Tm-Tl}{j} \quad (\text{IV.1})$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega_m \quad (\text{IV.2})$$

T_m est le couple moteur, T_L est le couple de charge, ω_m la vitesse angulaire du moteur et φ c'est l'angle du rotor.

L'approche alternative utiliser pour calculer le couple est la méthode d'Arkkio qui est basé sur l'intégration volumique du produit des densités de flux magnétique. Dans cette méthode, le couple utile est exprimé par l'équation IV.3

$$T_m = \frac{1}{\mu_0(r_o - r_i)} \int r s Br B_\varphi ds \quad (\text{IV.3})$$

r_o est le rayon extérieur, r_i est le rayon intérieur, et S est la section transversale de l'entrefer. La densité de flux magnétique dans les directions radiale et azimutale est respectivement B_r et B_φ .

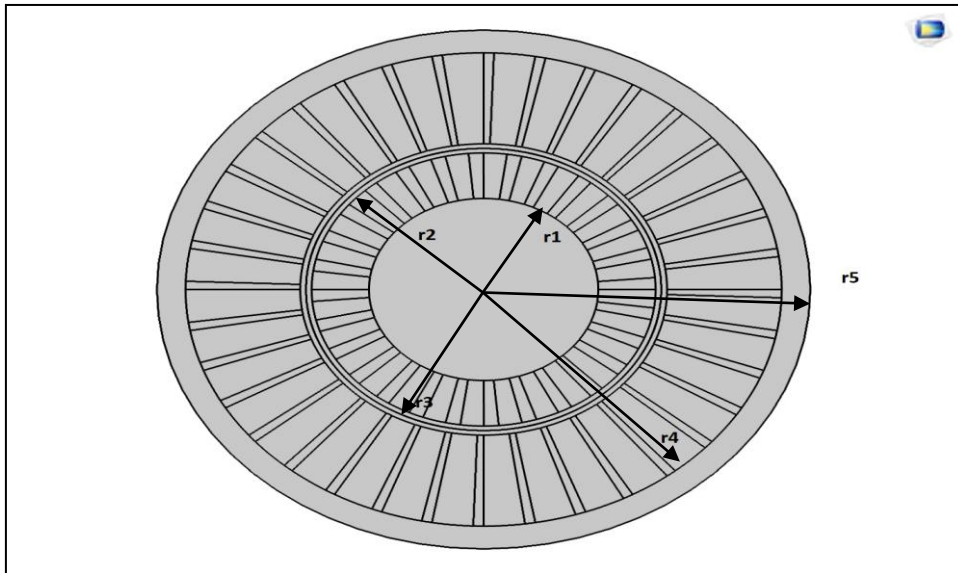


Figure IV.1. La géométrie de la machine

Name	Expression	Description
f 0	60[Hz]	Fréquence d'alimentation
W0	376.99	Vitesse de rotation
N0	700	Nombre de spires
L	1m	Longueur de moteur
r 1	0.02m	Rayon extérieur du rotor
r 2	0.03m	Rayon intérieur du rotor

r 3	0.032m	Rayon intérieur de l'enroulement
r 4	0.052m	Rayon intérieur du stator
r 5	0.057m	Rayon extérieur du stator
entrefer	0.002m	Entrefer entre stator et rotor
Ia	$1[A]*\sqrt{2}*\cos(w0*t)$	Courant dans la phase A
Ib	$1[A]*\sqrt{2}*\cos(w0*t+120[deg])$	Courant dans la phase B
Ic	$1[A]*\sqrt{2}*\cos(w0*t-120[deg])$	Courant dans la phase C

Tableaux IV.1. Les dimension et les paramètres de la machine

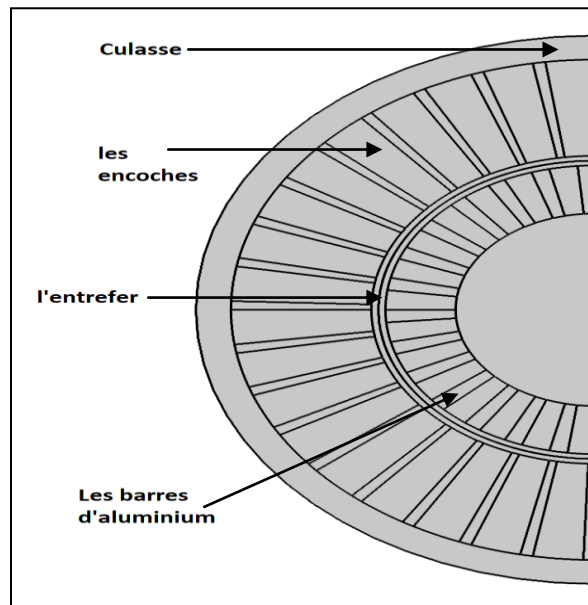


Figure IV.2. Une coupe de cette machine.

IV.2.1. Introduction des propriétés des domaines

Le but ici est de définir les paramètres physiques qui définissent le domaine d'étude : la conductivité électrique, la perméabilité magnétique etc. Les paramètres sont évidemment liés à notre modèle physique étudié.

Pour résoudre le système d'équation présenté précédemment, il est nécessaire de définir un certain nombre de conditions aux limites à chaque frontière de domaine est associé un segment orienté. Il est possible de donner des valeurs de condition aux limites pour chacun de ces segments. Les options seront différentes suivant qu'il s'agisse ou non d'une frontière intérieure au système

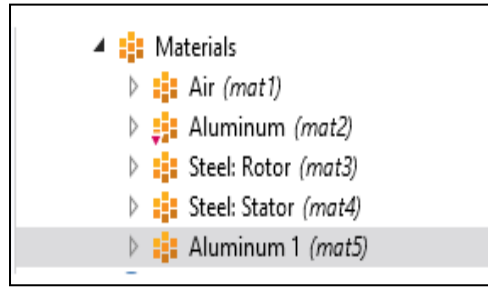


Figure IV.3. Propriétés des domaines

IV.2.2. Paramétrage et calcul du maillage

Le maillage des domaines est automatique. Il est possible de le raffiner globalement ou de manière localisée.

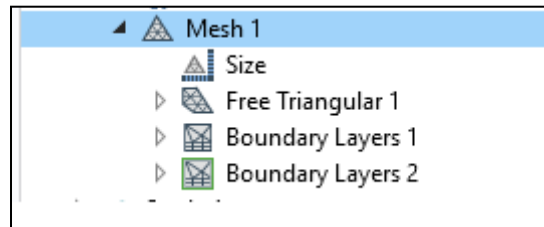


Figure IV.4. Les étapes à suivre pour faire le maillage.

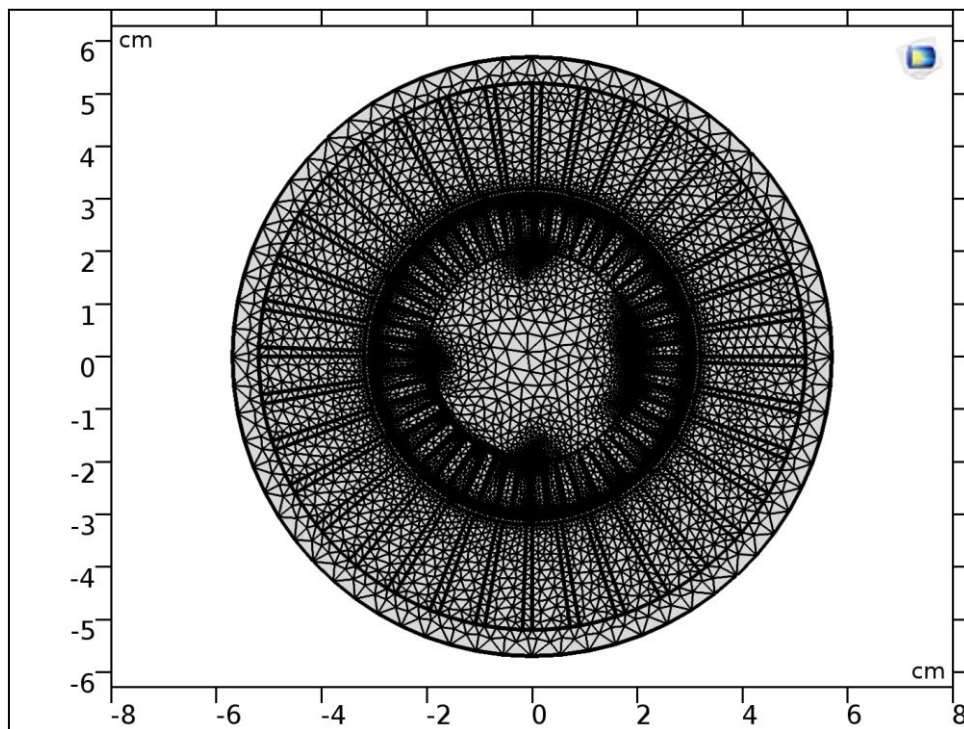


Figure IV.5. Le maillage du domaine d'étude.

IV.3.Application N° 1 : Modélisation et simulation de la machine asynchrone triphasée à cage à l'état sain

Le post processeur du logiciel COMSOL-Multiphysics permet de visualiser en 1D et 2D les diverses grandeurs magnétiques et mécaniques.

Les figures IV.6 et IV.7 représentent respectivement les vecteurs de l'induction magnétique à l'état sain à l'instant $t = 6s$ et la densité du courant avec les lignes du vecteur de potentiel magnétique à l'instant $t = 6s$.

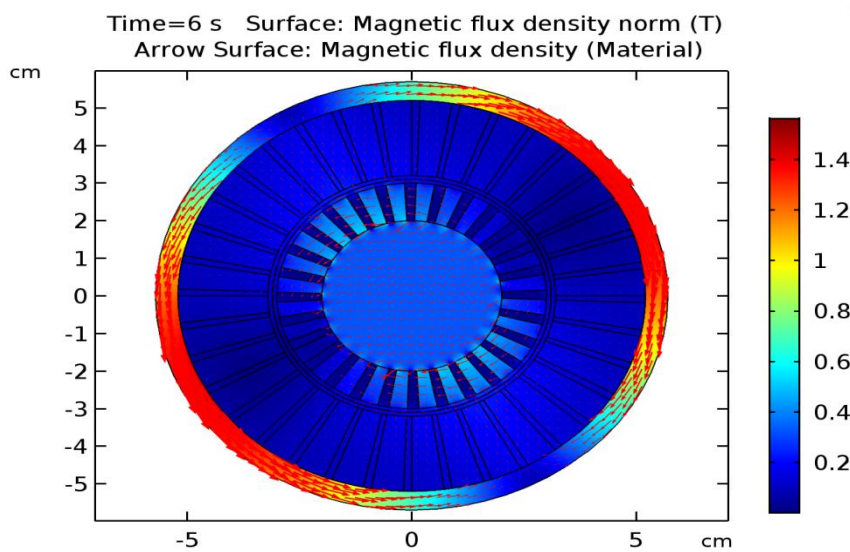


Figure IV.6. Les vecteurs de l'induction magnétique à l'instant $t = 6s$

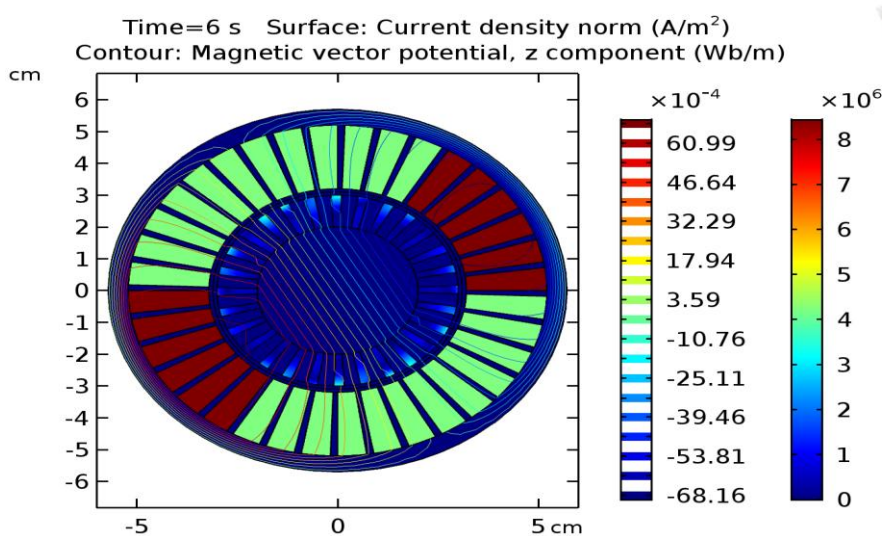


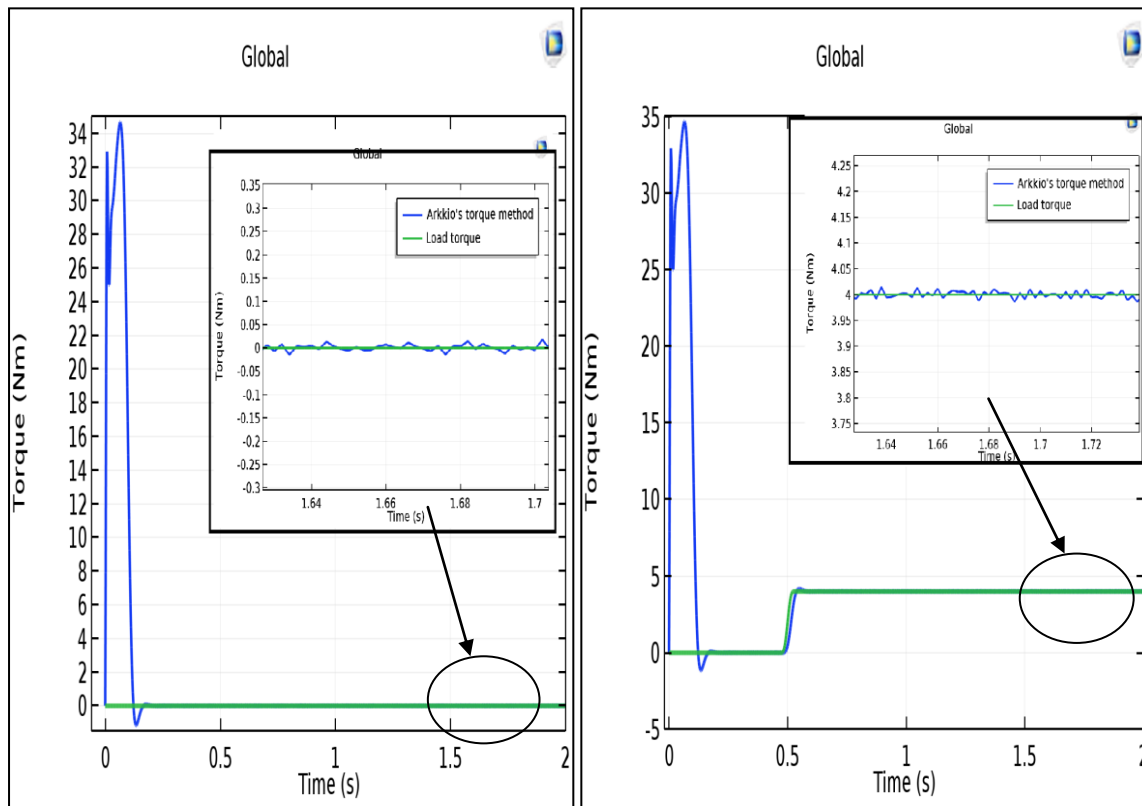
Figure IV.7. La densité du courant avec les lignes du vecteur de potentiel magnétique à l'instant $t = 6s$.

IV.3.1. Interprétation

D'après ces résultats, on constate que la distribution de potentiel vecteur magnétique est intense au voisinage des bobines du stator, il atteint des valeurs maximales à cause de la valeur intense du courant dans les bobines. Cette augmentation provoque une augmentation de l'induction magnétique, il atteint la valeur de 1,4 T. Nous remarquons aussi que les lignes du champ magnétique sont canalisés dans le circuit magnétique à cause de la perméabilité magnétique qui est importante dans cette région par rapport à l'air.

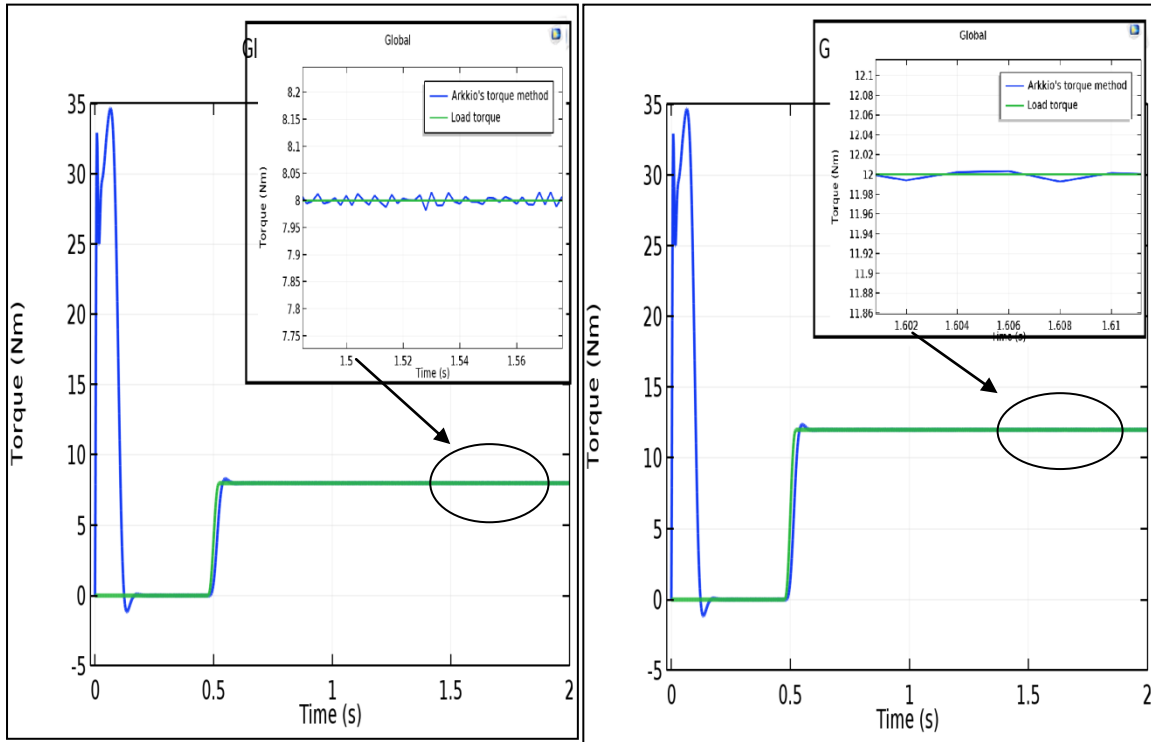
IV.3.2. Résultats de simulation

Pour observer et visualiser le comportement du modèle de la machine simulé, des différentes valeurs de couple résistant (0, 4, 8, 12, 15, 20) N.m sont appliqués à la machine à l'instant $t=0.5$ s. La simulation du modèle du moteur asynchrone avec un rotor sain est donnée par les courbes de la vitesse (figure IV.9) et par le couple utile est présenté dans la figure (IV.8). Toutes ces courbes correspondent bien à un fonctionnement normal du moteur asynchrone.



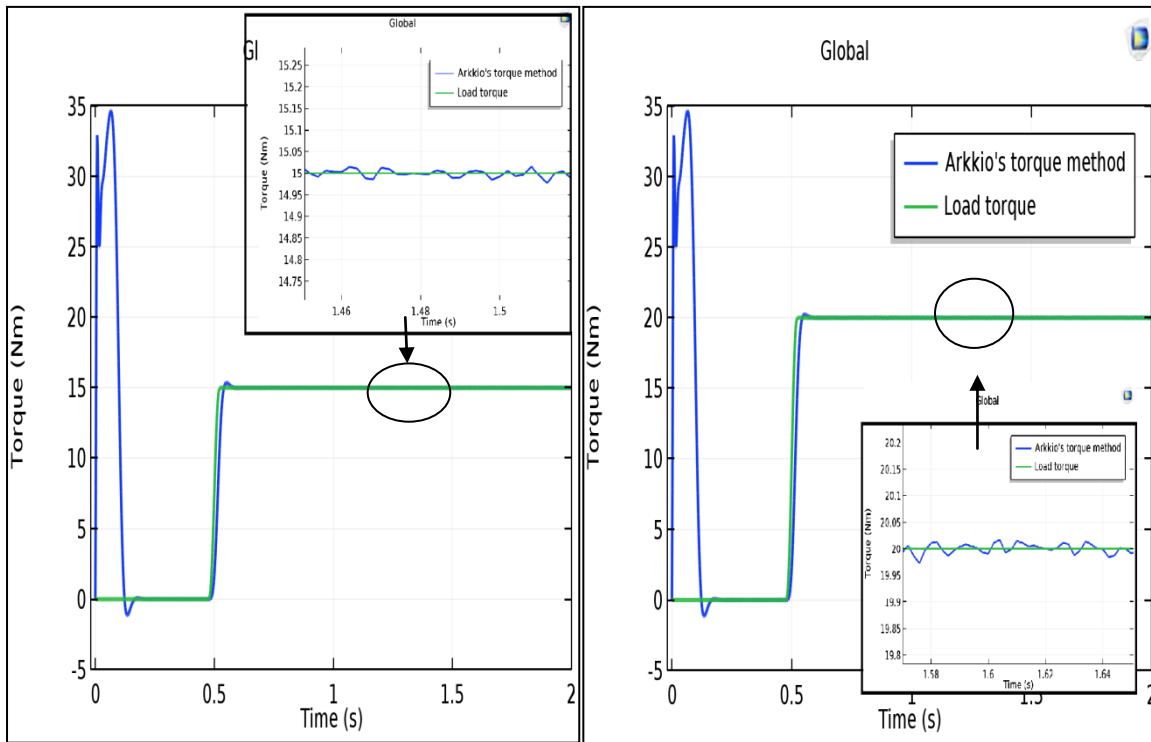
(a)

(b)



(c)

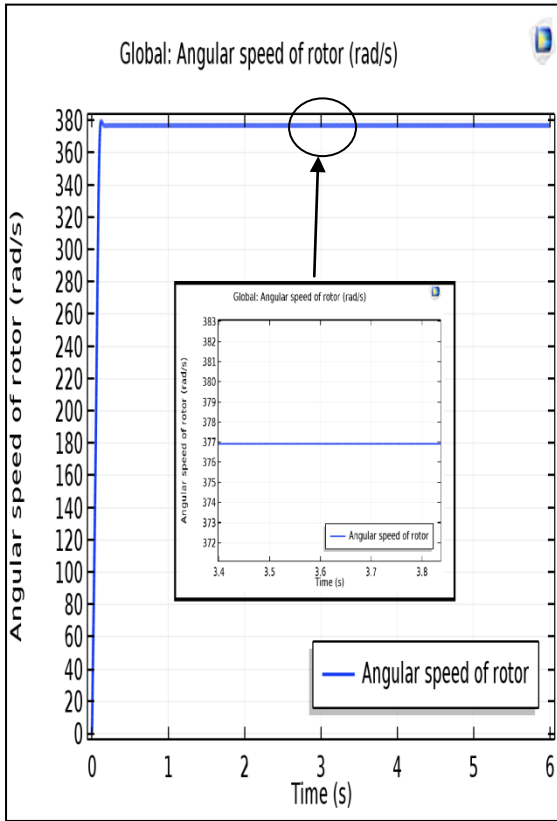
(d)



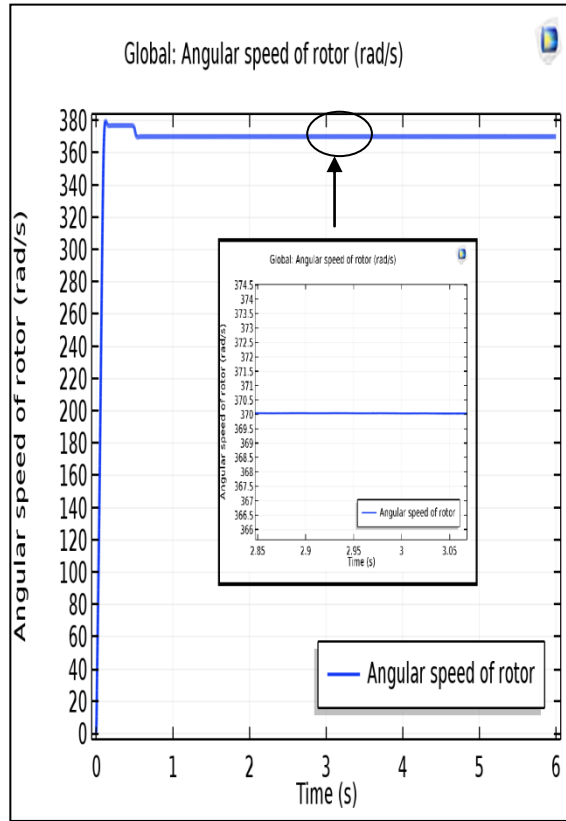
(e)

(f)

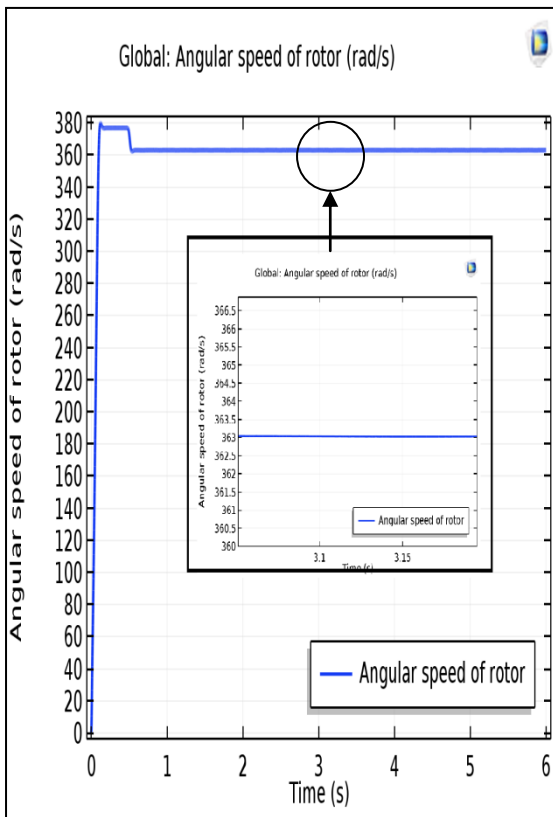
Figure IV.8. (a-f) La variation instantanée de couple utile à l'état sain pour différents valeur du couple résistant respectivement $C_r = 0, 4, 8, 12, 15$ et 20 N.m.



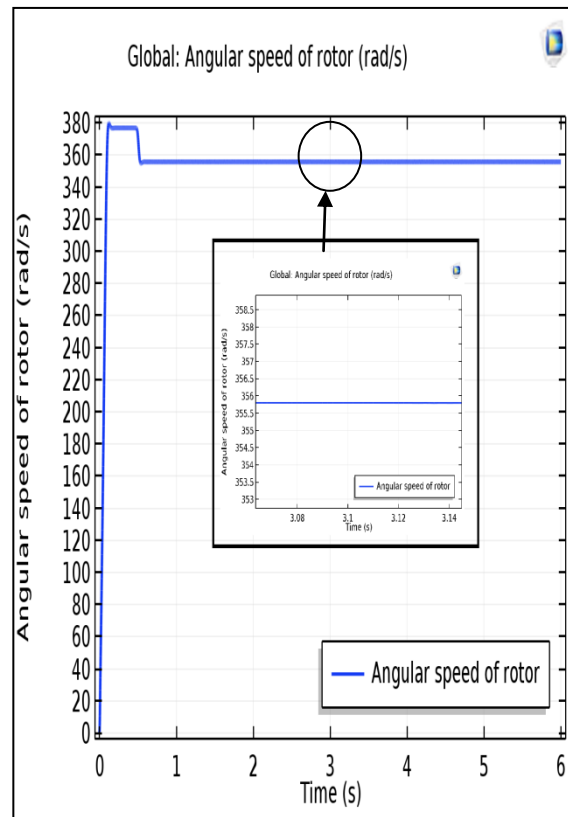
(a)



(b)



(c)



(d)

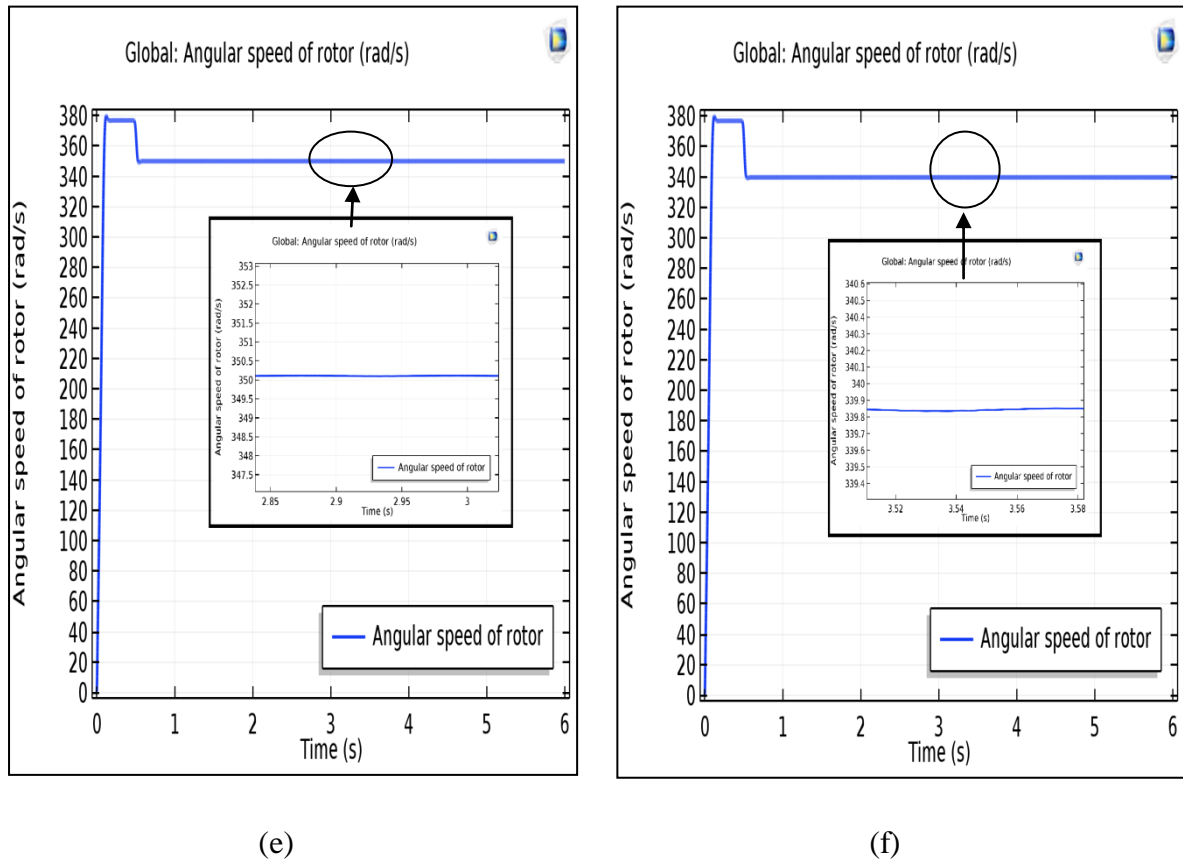


Figure IV.9. (a-f) : La variation instantanée de la vitesse de rotation à l'état sain pour différentes valeurs du couple résistant respectivement $C_r = 0, 4, 8, 12, 15$ et 20 N.m.

IV.3.2.1. Interprétation

A l'instant $t=0.5$ s, nous appliquons des différentes valeurs de couple résistant (à vide, 4, 8, 12, 15, et 20) N.m. La figure (IV.8) montre l'évolution du couple utile, et la figure (IV.9) montre l'évolution de la vitesse. Les formes des graphes montrent qu'en phase de démarrage le moteur subit un allongement du régime transitoire. A titre d'exemple, nous prenons la courbe du couple utile. Cette dernière comprend au début une série d'oscillations d'amplitude élevées qui atteint $34,6$ N.m à cause de la valeur élevée de l'induction magnétique (1.4T) pour les six cas. A partir de cette phase, le couple utile se stabilise durant un régime permanent, il atteint respectivement les valeurs imposées du couple résistant 4, 8, 12, 15 et 20 N.m. on peut observer des très faibles oscillations dans le régime permanent de la courbe du couple utile et de la vitesse de rotation de la machine. L'évolution instantanée de la vitesse est influencée par la variation du couple c'est-à-dire elle passe par un régime transitoire durant la même période c'est-à-dire elle prend une valeur élevée. Lorsqu'on impose un couple résistant, la vitesse

diminue avec l'augmentation du couple résistant. Elle atteint respectivement les valeurs 370, 363, 355,8, 350, 340 rad/s pour un couple résistant 4, 8, 12, 15 et 20 N.m.

IV.3.3. Etat sain par l'étude spectrale

Nous prenons les valeurs du couple utile et la vitesse de rotation à partir des courbes illustrés sous COMSOL–Multiphysics, ensuite nous exportons ces valeurs sous forme d'une deux matrices dans l'environnement MATLAB. Dont l'objectif de faire l'analyse spectrale des deux signaux couple et vitesse par l'utilisation de la technique de transformation de Fourier (FFT).

Les figures IV (10-15) représentent respectivement les spectres du couple utile à l'état sain et la figure IV (16-21) représentent les spectres de la vitesse de rotation pour différentes valeurs de couple résistant (à vide, 4, 8, 12, 15, et 20) N.m

- **Les spectres du couple utile**

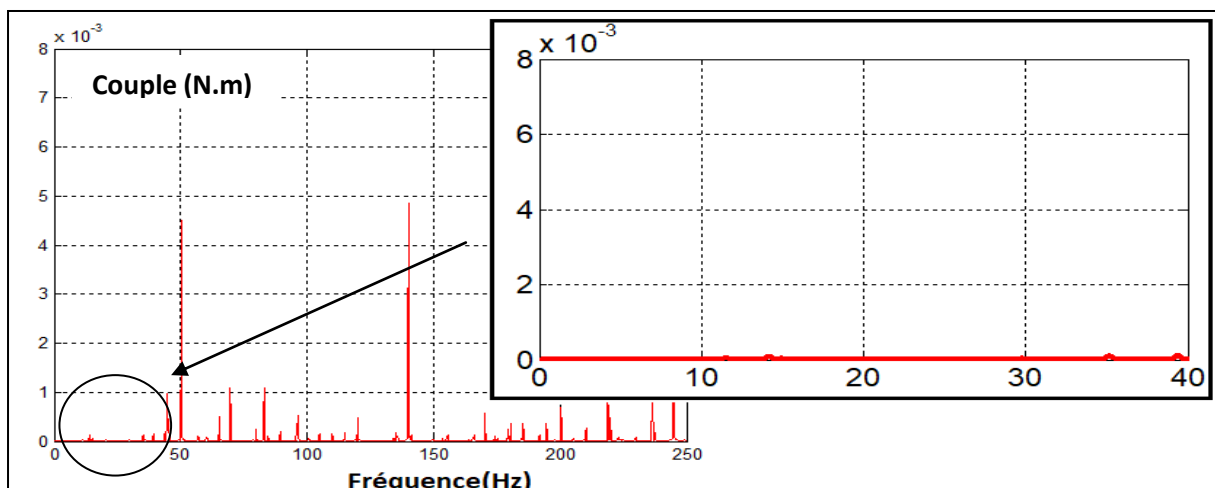


Figure IV.10. Spectre du couple utile pour une machine saine à vide.

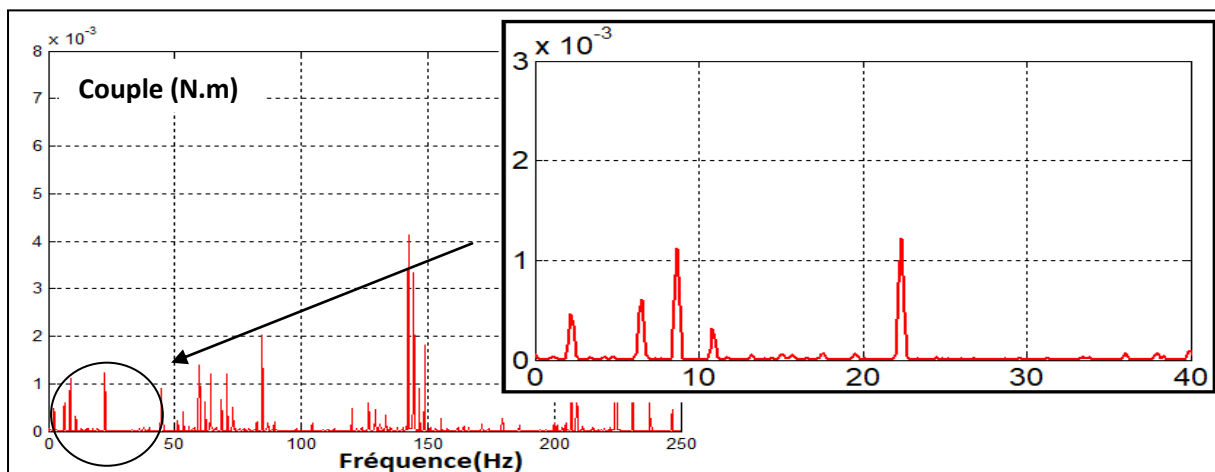


Figure IV.11. Spectre du couple utile pour une machine saine $C_r=4\text{N.m}$.

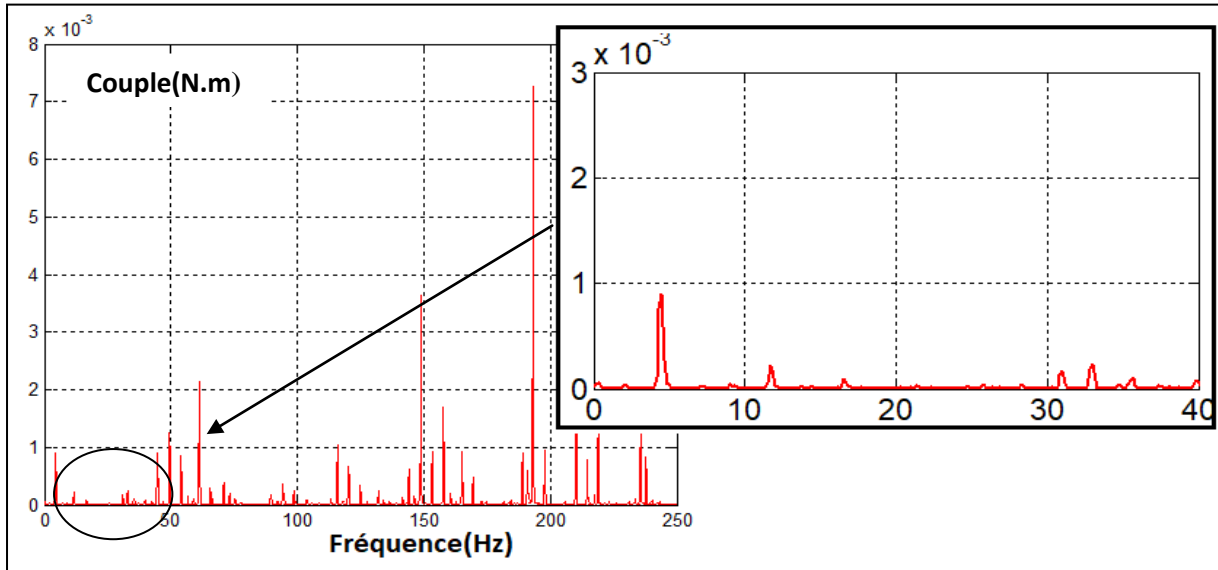


Figure IV.12. Spectre du couple utile pour une machine saine $Cr=8N.m$.

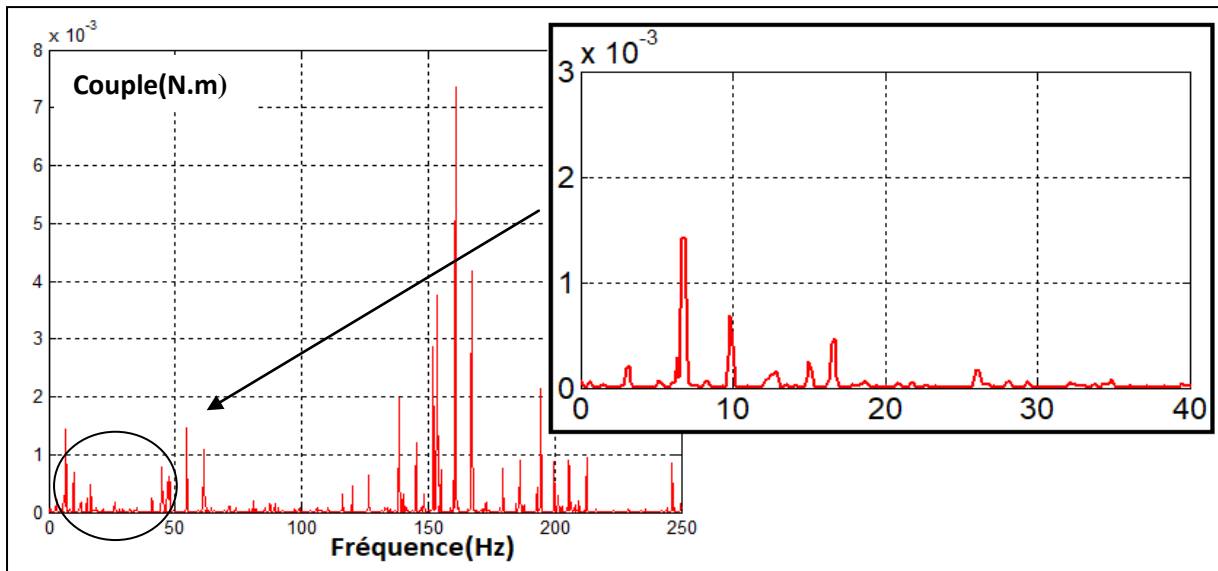


Figure IV.13. Spectre du couple utile pour une machine saine $Cr=12N.m$.

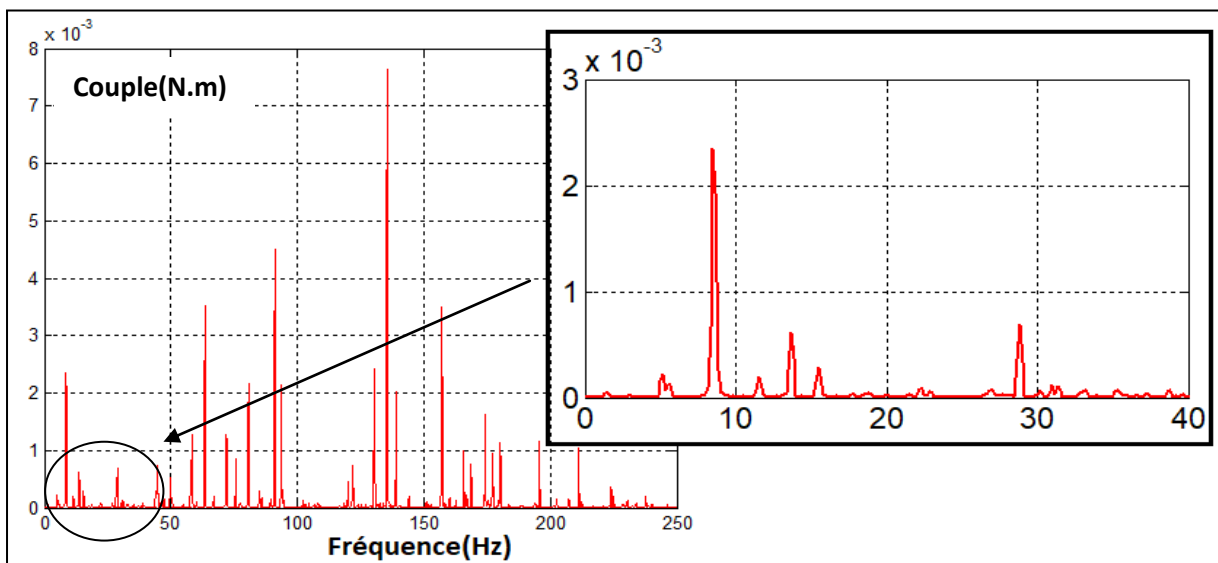


Figure IV.14. Spectre du couple utile pour une machine saine $Cr=15N.m$.

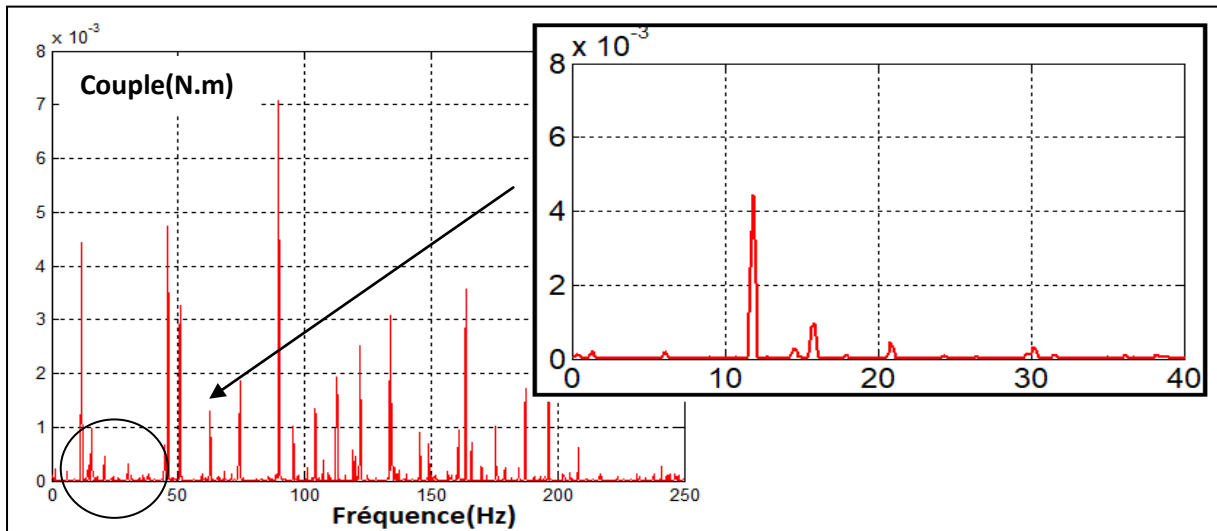


Figure IV.15. Spectre du couple utile pour une machine saine $Cr=20N.m$.

- Les spectres de la vitesse de rotation

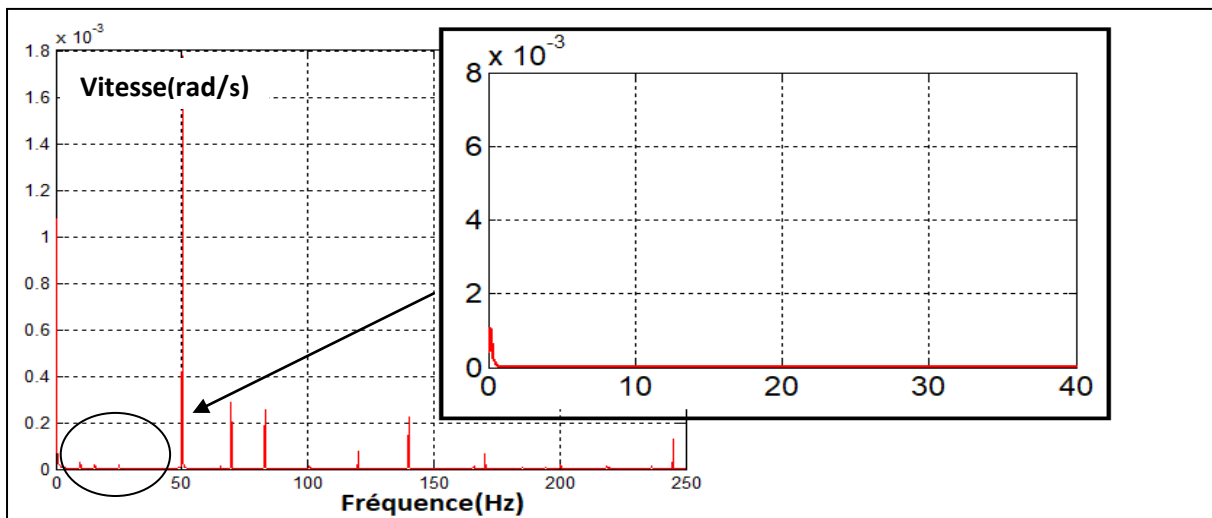


Figure IV.16. Spectres de la vitesse de rotation à l'état sain pour une machine à vide

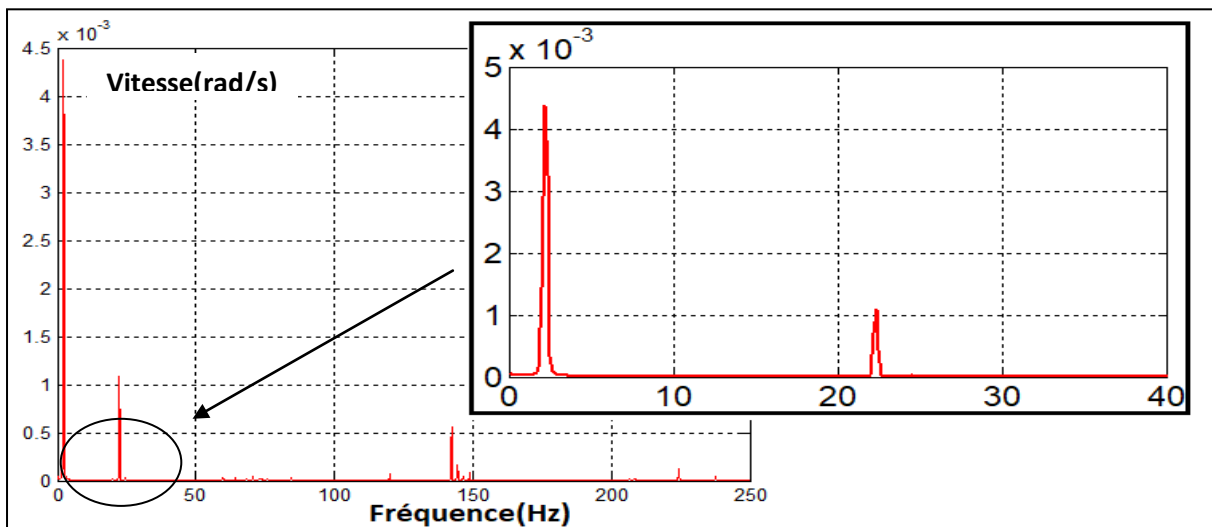


Figure IV.17. Spectres de la vitesse de rotation à l'état sain pour $Cr=4N.m$

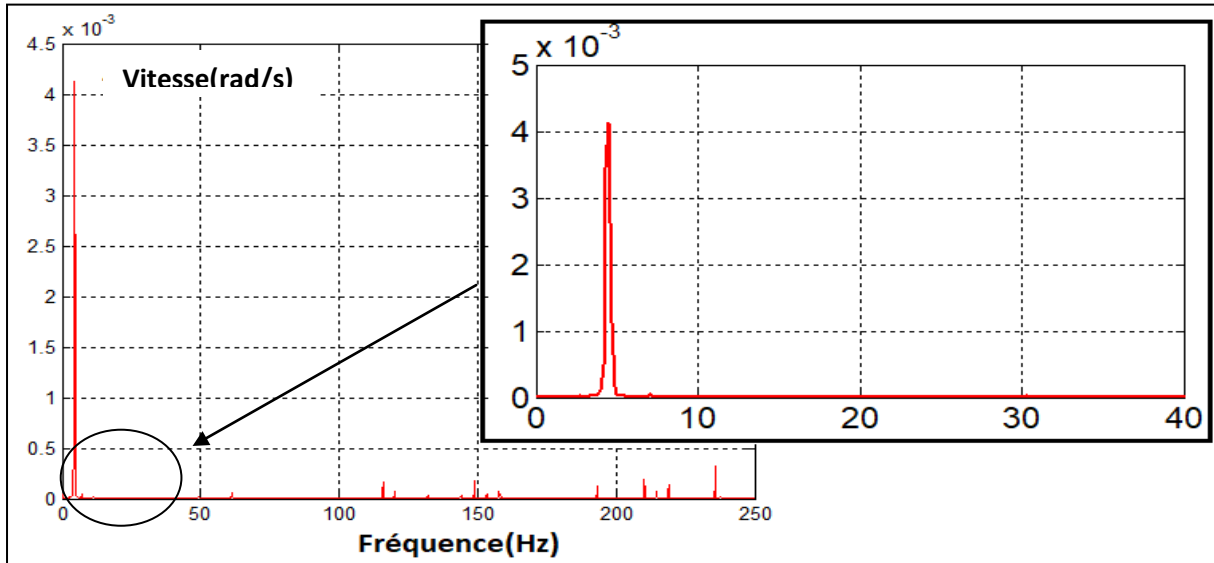


Figure IV.18. Spectres de la vitesse de rotation à l'état sain pour $Cr=8N.m$

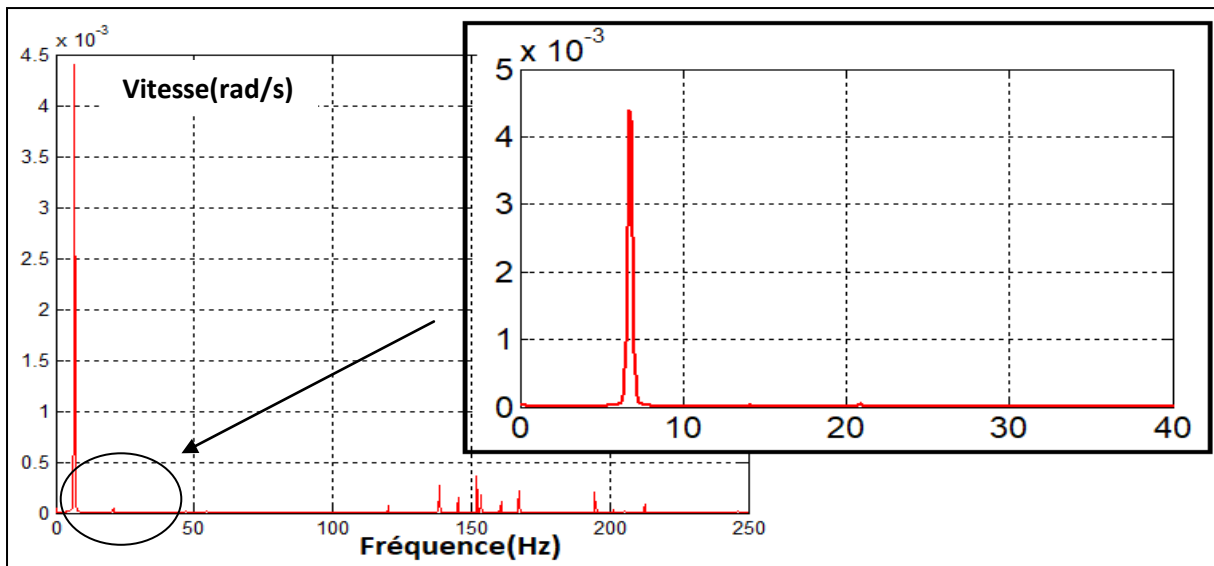


Figure IV.19. Spectres de la vitesse de rotation à l'état sain pour $Cr=12N.m$

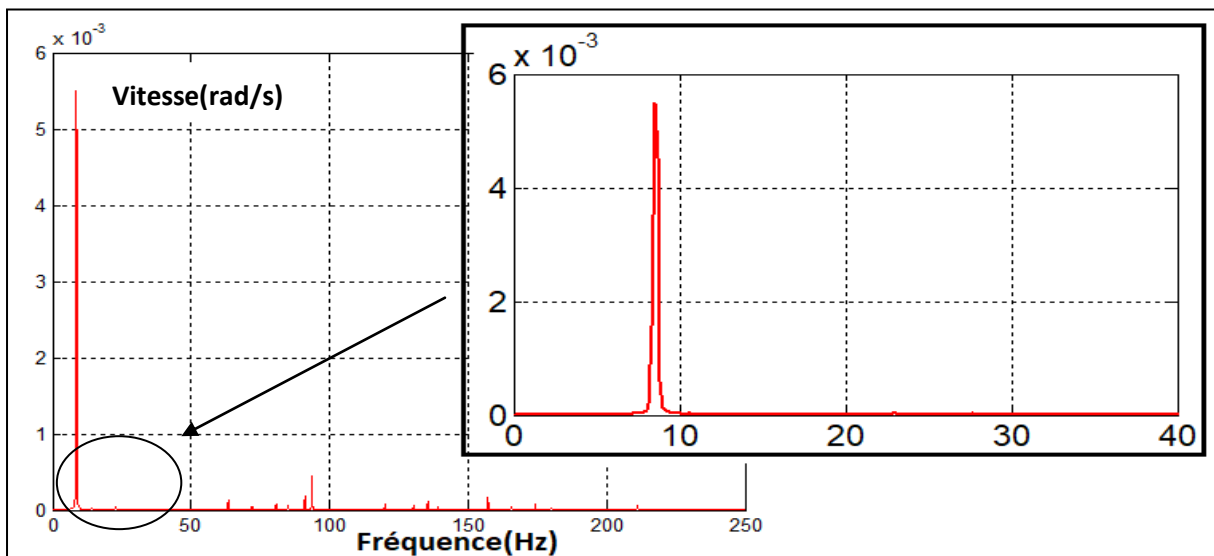


Figure IV.20. Spectres de la vitesse de rotation à l'état sain pour $Cr=15N.m$

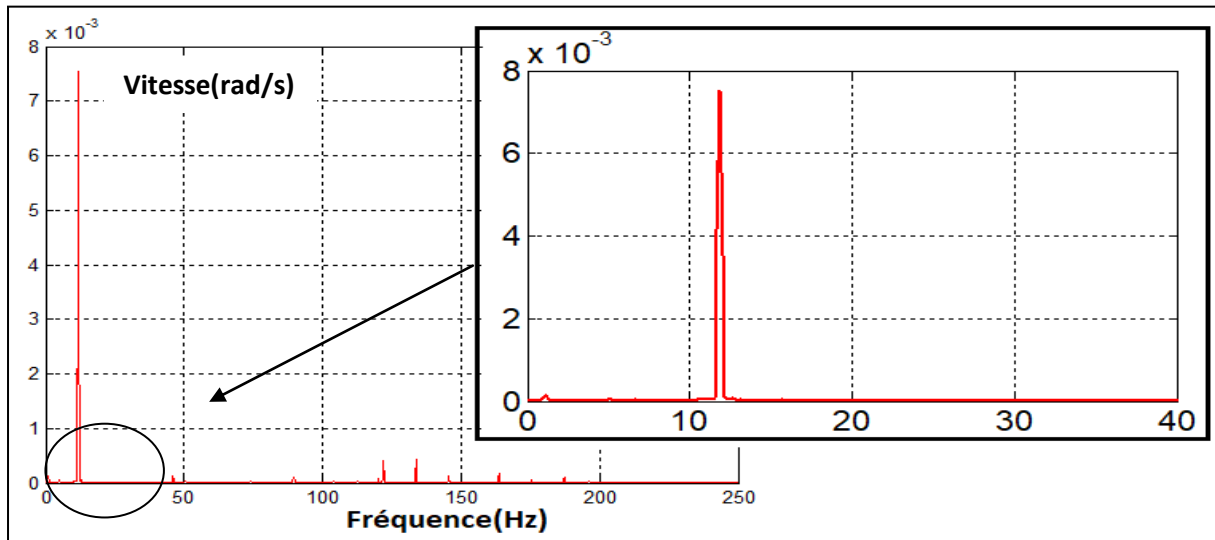


Figure IV.21. Spectres de la vitesse de rotation à l'état sain pour $C_r=20\text{N.m}$

IV.3.3.1. Interprétation

Le modèle de la machine asynchrone à l'état sain a été simulé à vide et avec différentes valeurs de couple résistant (4, 8, 12, 15, et 20) N.m sous une alimentation triphasée nominale et équilibrée dont les résultats sont présentés dans les figures (IV.8) et (IV.9) pour un premier essai. Comme deuxième essai, on a pris les valeurs des courbes du couple utile et la vitesse de rotation à partir du COMSOL-Multiphysics et on l'exporte sous forme des matrices dans le MATLAB dont l'objectif de faire l'étude spectrale par l'intermédiaire de la technique du transformé de Fourier FFT. Les résultats sont présentés dans les figures IV (10-15) et les figures IV (16-21). Ces figures montrent que ces signaux (couple et vitesse) ne contiennent aucune harmonique signature de défaut, ce qui confirme que notre machine étudié est dans l'état sein.

IV.4. Application N° 2 : Modélisation et simulation de la machine asynchrone triphasée à cage avec défaut d'une cassure de barre

Le post processeur du logiciel COMSOL-Multiphysics permet de visualiser en 1D et 2D les diverses grandeurs magnétiques et mécaniques. Les cassures des barres sont les défauts les plus fréquents au rotor. Leurs simulations permettent d'identifier les signatures de ces défauts et de prévoir les détériorations générées dans la machine. Pour illustrer le défaut de cassure des barres, nous avons effectué la simulation du moteur dans les cas d'une seule barre cassée.

IV.4.1. Simulation du défaut de cassure de barre rotorique par logiciel COMSOL-Multiphysics

Afin d'obtenir une cassure de barre dans le logiciel COMSOL-Multiphysics, il faut réduire la valeur de la conductivité électrique d'une barre d'aluminium de rotor. Pour un premier essai, on va prendre la valeur de 1 [S/m], comme illustré dans la figure IV.22

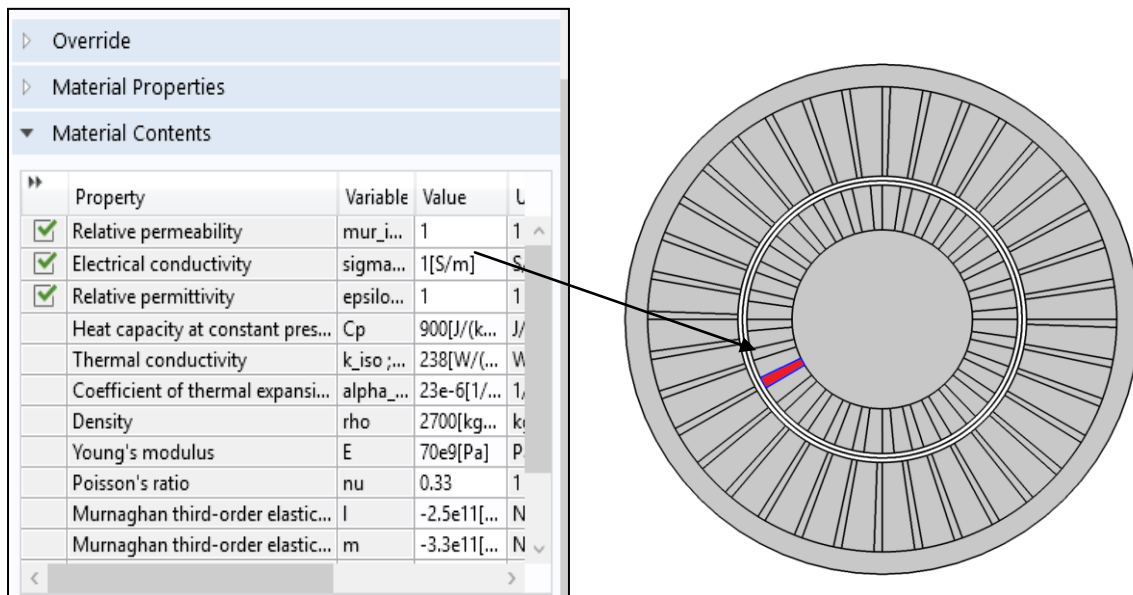
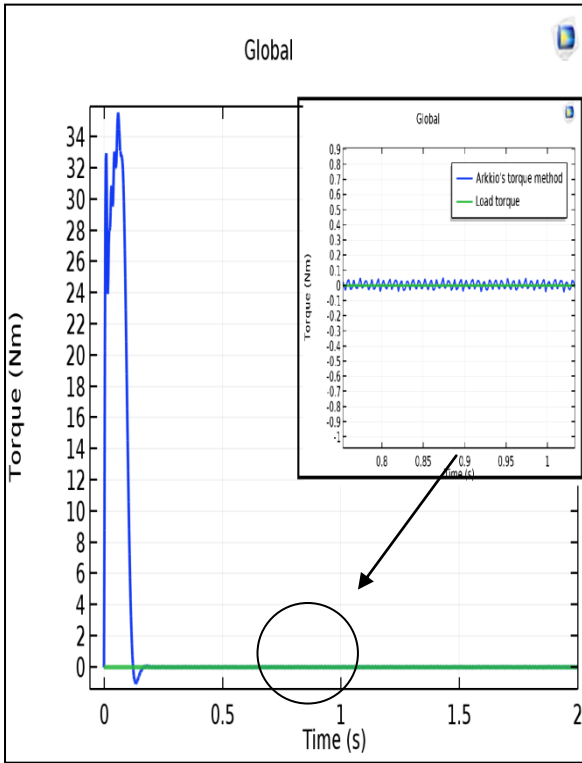
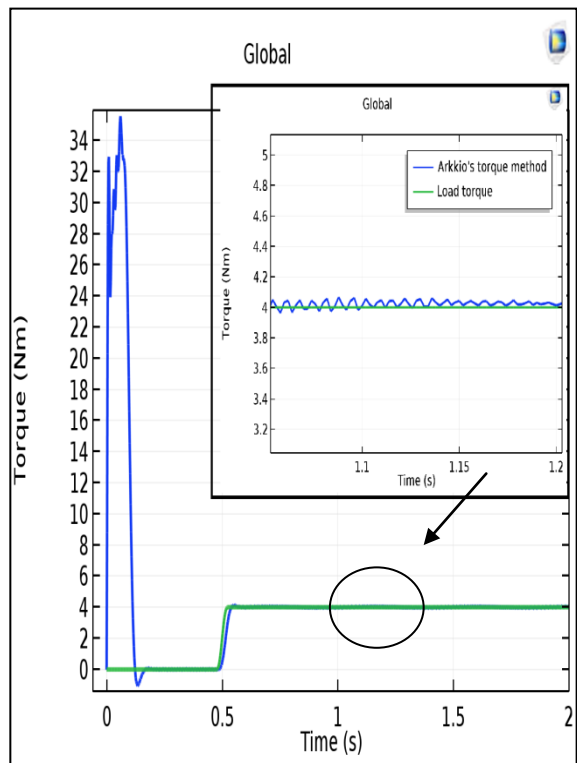


Figure IV.22.Le cassure de barre dans logiciel COMSOL-Multiphysics

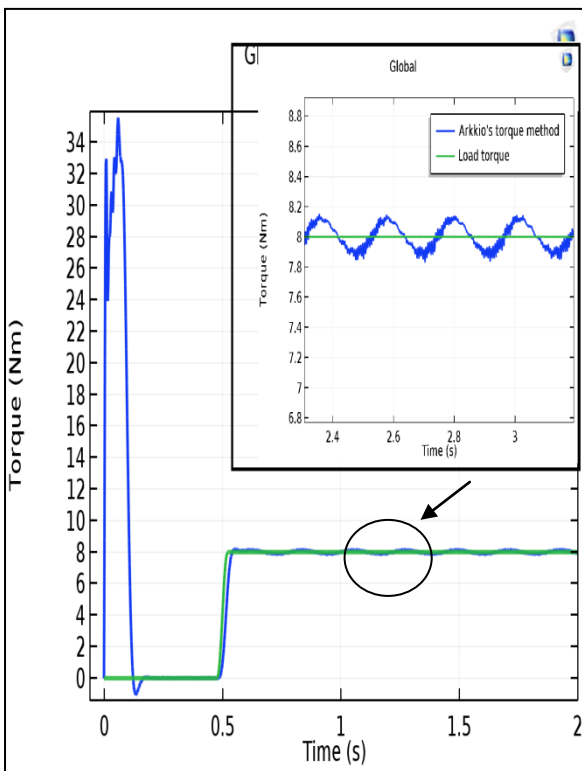
Pour observer le comportement du modèle simulé, différentes valeurs de couple résistant (0, 4, 8, 12, 15, 20) N.m sont imposé à la machine étudié à l'instant $t=0.5$ s. Les figures IV.23. (a-f) et IV.24. (a-f) représentent respectivement la variation instantané du couple et de la vitesse de rotation avec cassure de barre pour différents valeur de la charge (à vide, 4, 8, 12, 15, 20)



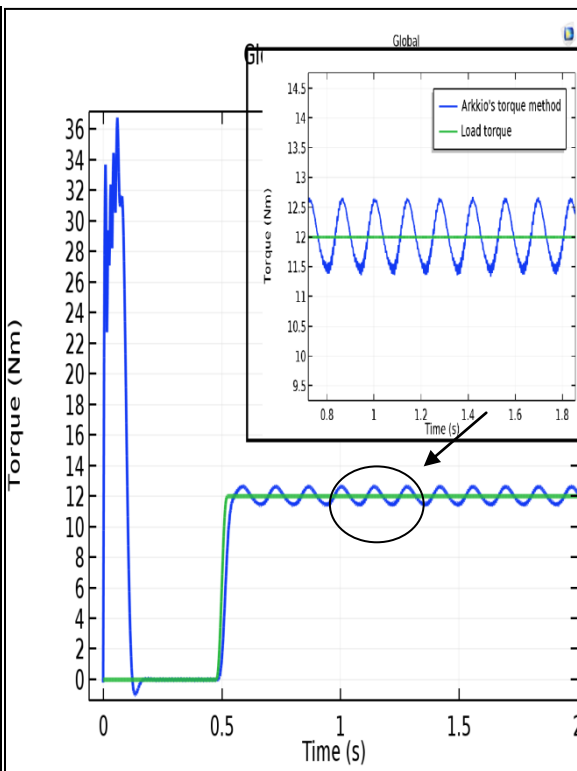
(a)



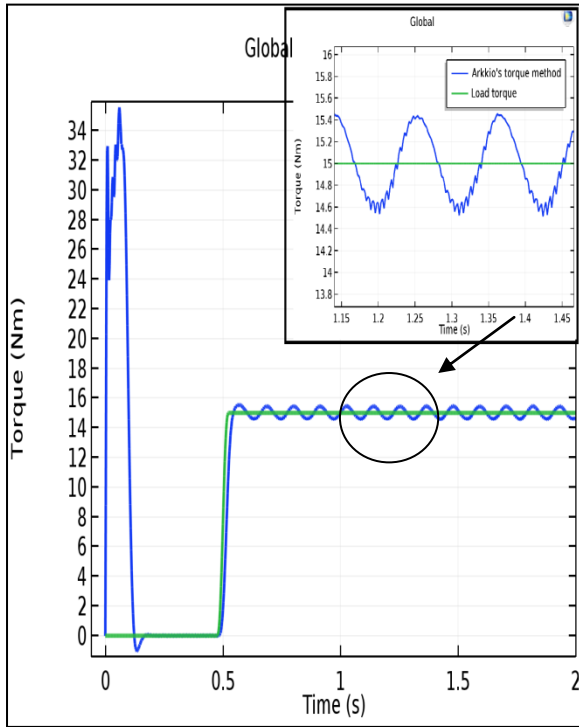
(b)



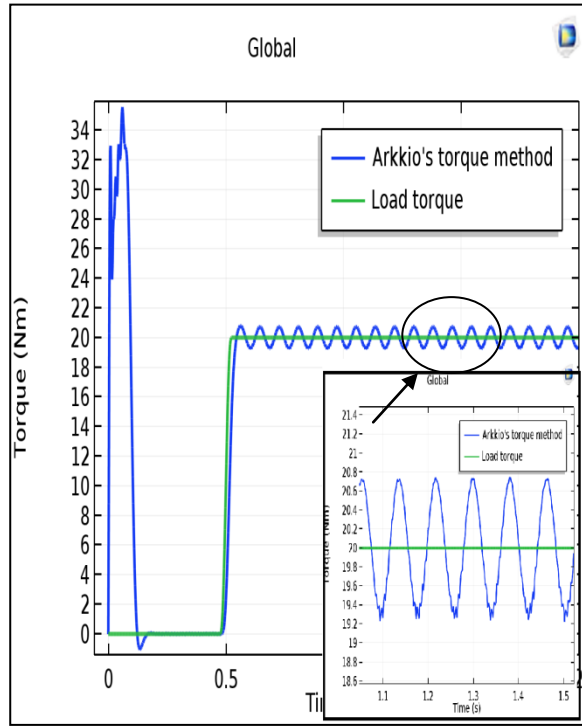
(c)



(d)

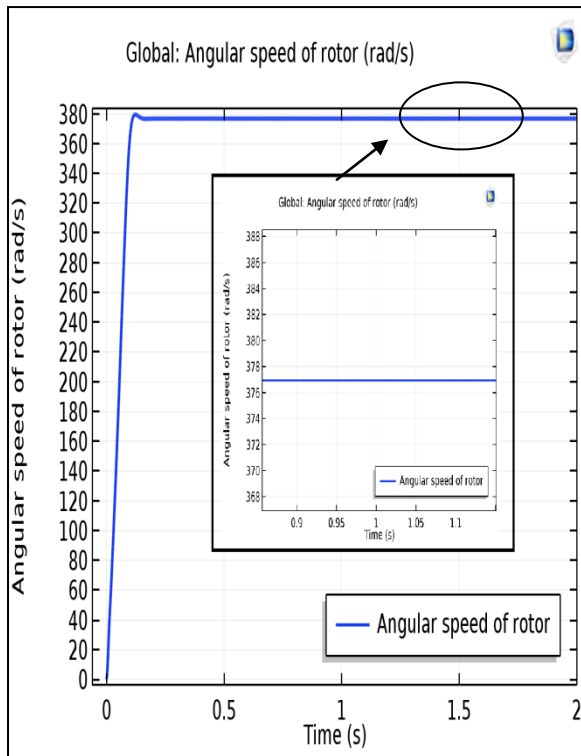


(e)

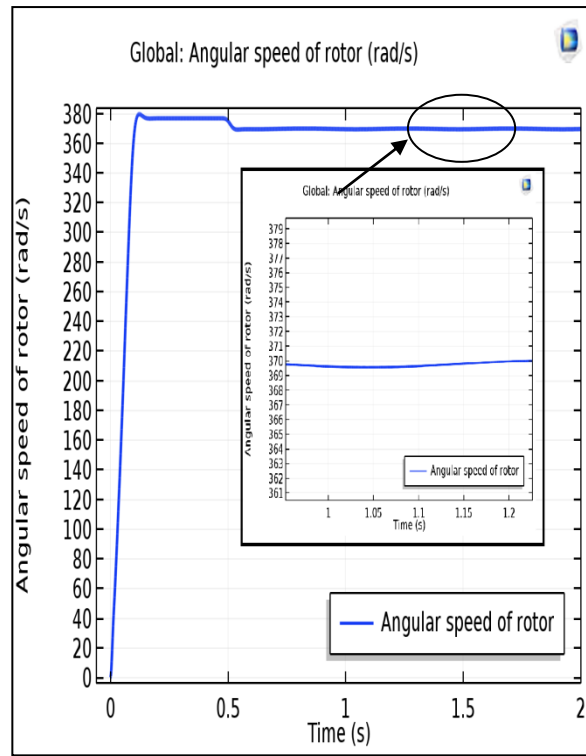


(f)

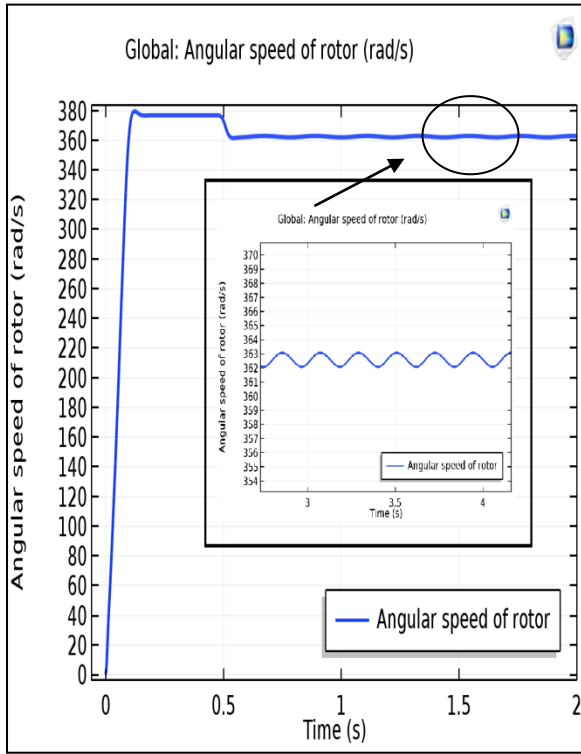
Figure IV.23. (a-f) La variation instantané du couple avec cassure de barre pour différents valeur de la charge (à vide, 4, 8, 12, 15, 20)



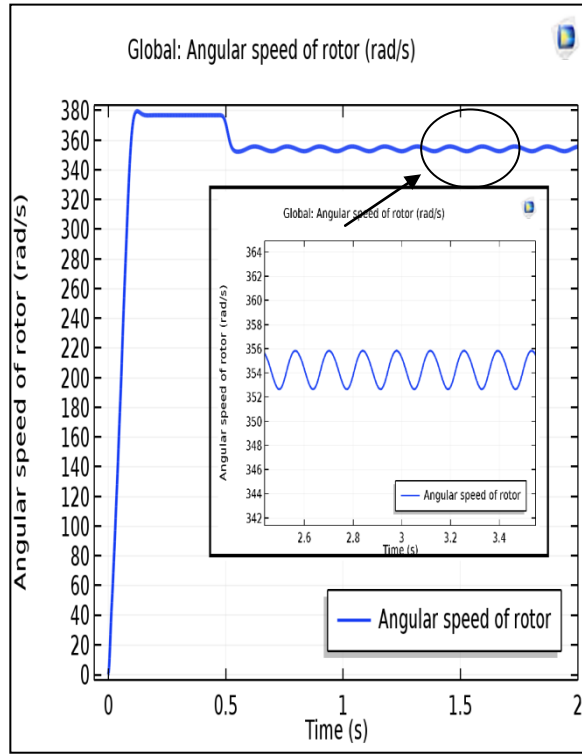
(a)



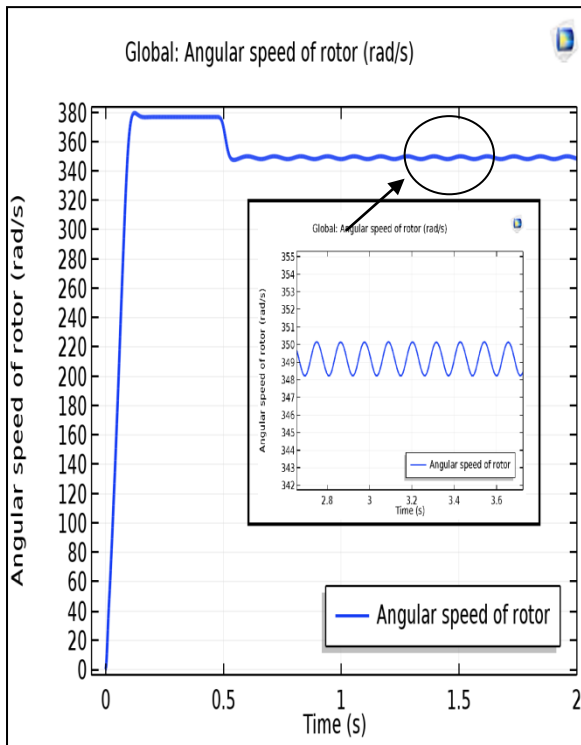
(b)



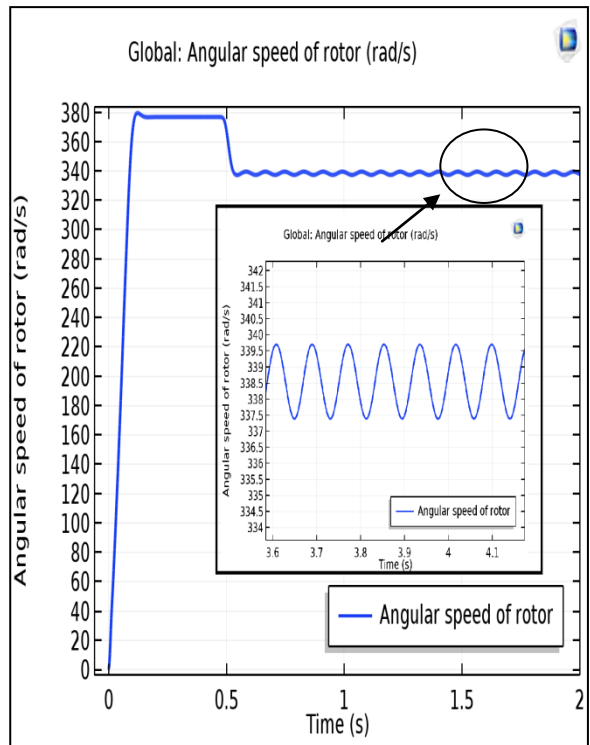
(c)



(d)



(e)



(f)

Figure IV.24. (a-f) La variation instantané de la vitesse de rotation avec cassure de barre pour différents valeur de la charge (à vide, 4, 8, 12, 15, 20)

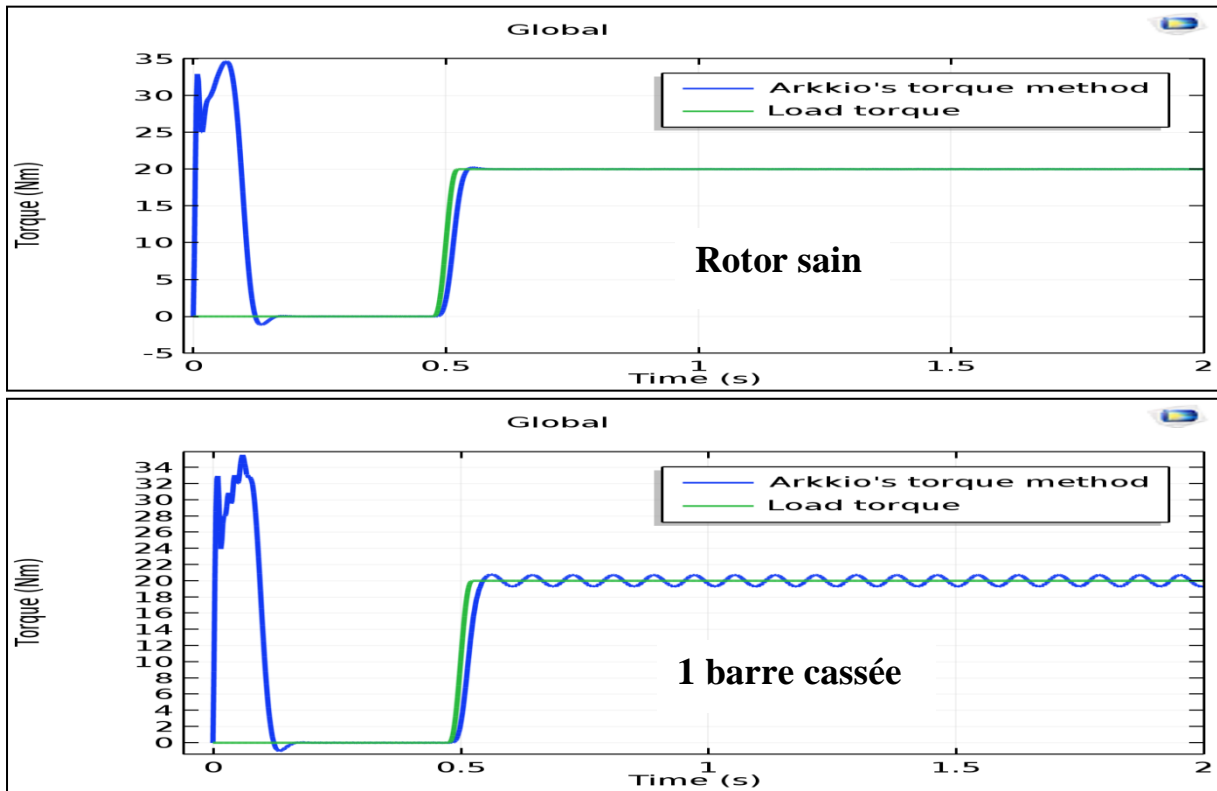


Figure IV.25 (a-b) Couple utile en pleine charge d'une machine asynchrone saine et défaillante respectivement.

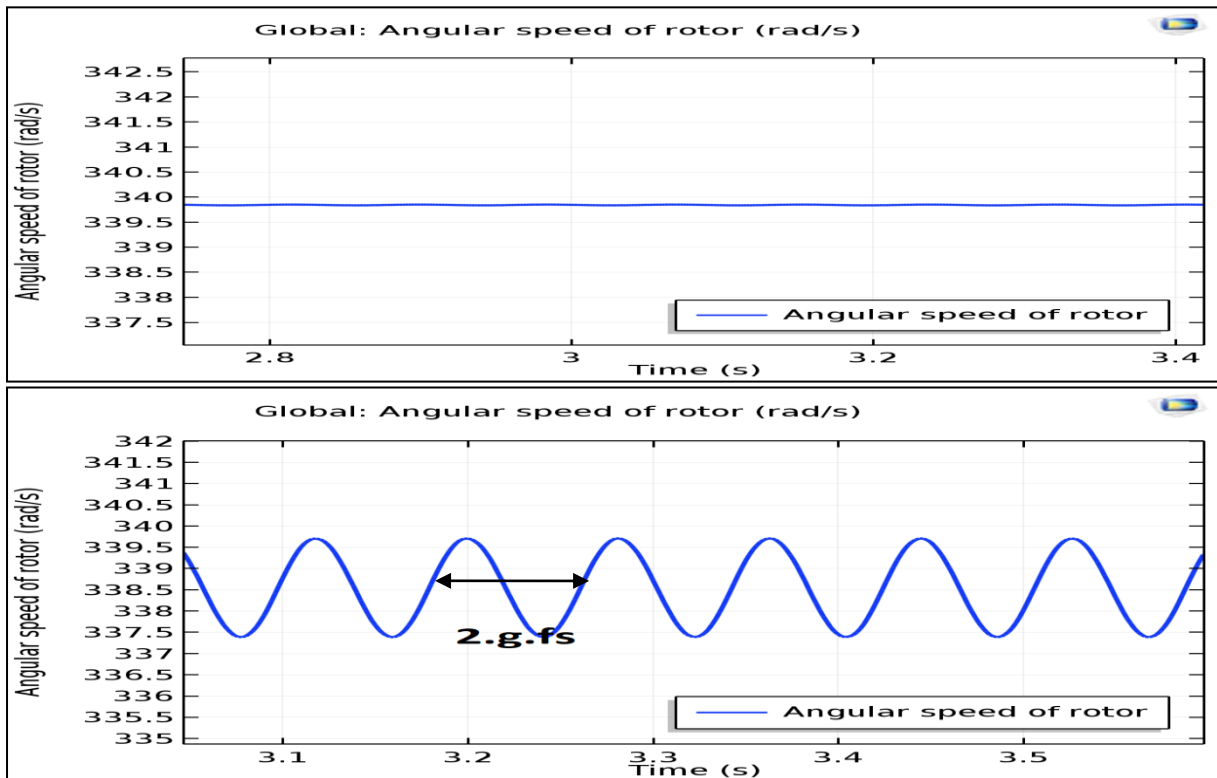


Figure IV.26 (a-b) Vitesse de rotation en pleine charge d'une machine asynchrone saine et défaillante respectivement.

IV.4.2. Interprétation

Nous remarquons qu'il est difficile d'observer l'effet de cassure de barre en régime permanent lorsque la machine est à vide. Mais en pleine charge, on peut clairement observer l'augmentation de l'amplitude des ondulations dans l'allure de couple et de la vitesse de rotation (figure IV.23 figure IV.24). Donc on peut dire que l'augmentation de la charge donne des informations plus claires et plus visibles sur l'allure de couple et de vitesse de la machine défaillante.

La figure IV.26 montre la vitesse de rotation de la machine asynchrone pour les deux cas étudié, il s'agit d'une machine saine et l'autre défaillante en pleine charge. On peut observer que le défaut de cassure de barre génère des oscillations sur l'allure de vitesse en régime permanent. Ces oscillations se manifestent dans une période correspondant à une fréquence de 2.g.fs. On peut aussi remarquer des oscillations dans l'allure de couple de la machine défaillante comme l'illustre la figure IV.25 qui due à la cassure de barre.

IV.4.3. Etat de cassure de barre par l'étude spectrale

Nous prenons les valeurs du couple utile et la vitesse de rotation à partir des courbe illustrés sous COMSOL–Multiphysics, ensuite nous exportons ces valeurs sous forme d'une deux matrices dans l'environnement MATLAB. Dont l'objectif de faire l'analyse spectrale des deux signaux couple et vitesse par l'utilisation de la technique de transformation de Fourier (FFT).

Les figures IV (27-32) représentent les spectres du couple utile d'une machine défaillante (avec une barre cassée) pour différentes valeurs de couple résistant (à vide, 4, 8, 12, 15, et 20 N.m) respectivement.

Les figures IV (33-38) représentent les spectres de la vitesse de rotation d'une machine défaillante (avec une barre cassée) pour différentes valeurs de couple résistant (à vide, 4, 8, 12, 15, et 20 N.m) respectivement.

- Les spectres du couple utile

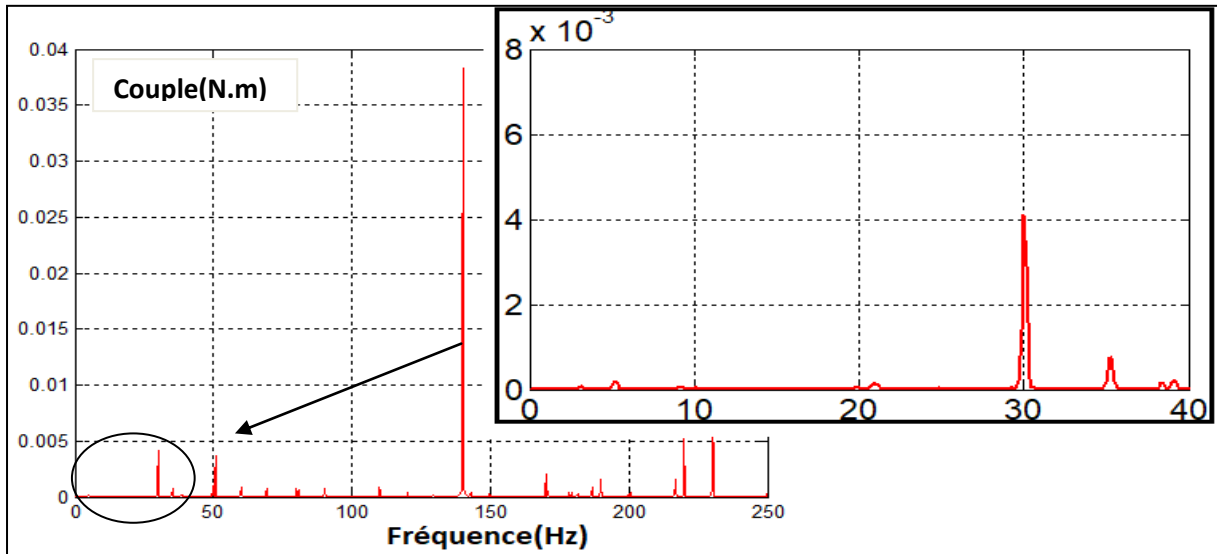


Figure IV.27. Spectre du couple utile d'une machine défaillante à vide

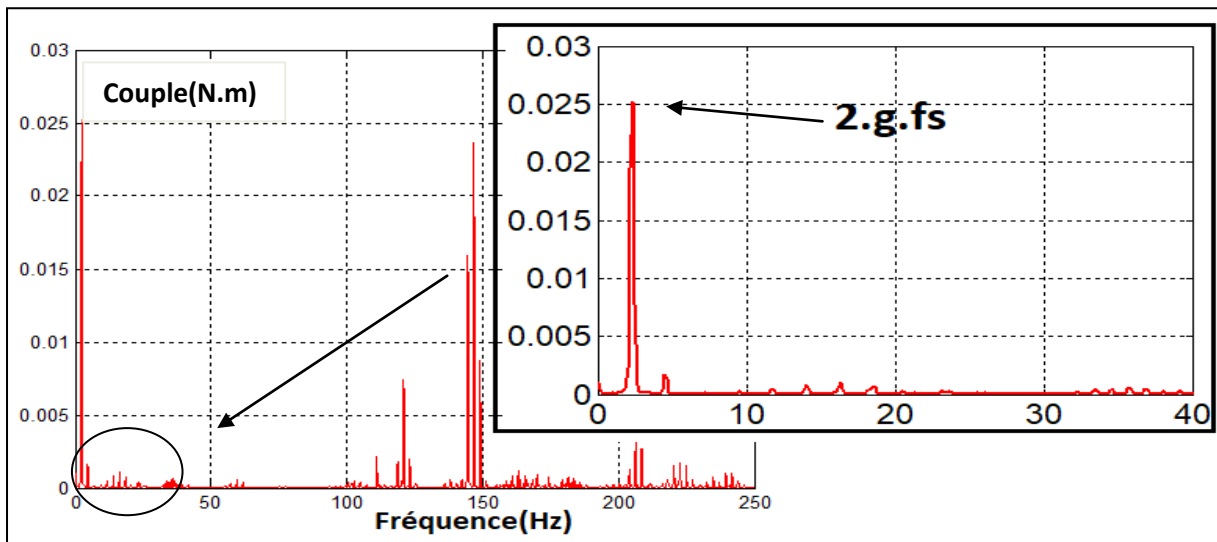


Figure IV.28. Spectre du couple utile d'une machine défaillante avec $Cr=4N.m$.

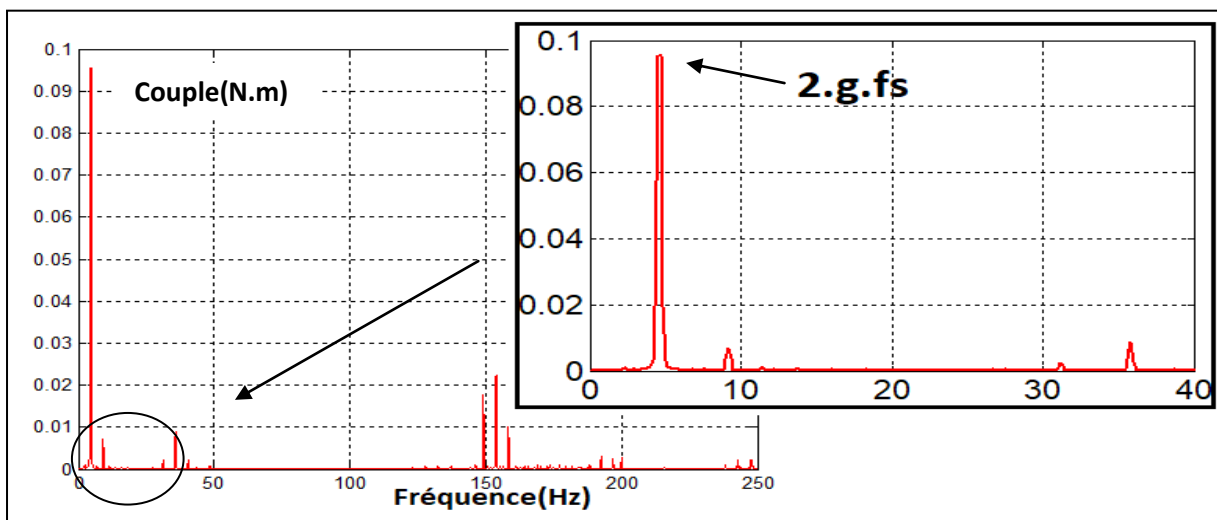


Figure IV.29. Spectre du couple utile d'une machine défaillante avec $Cr=8N.m$.

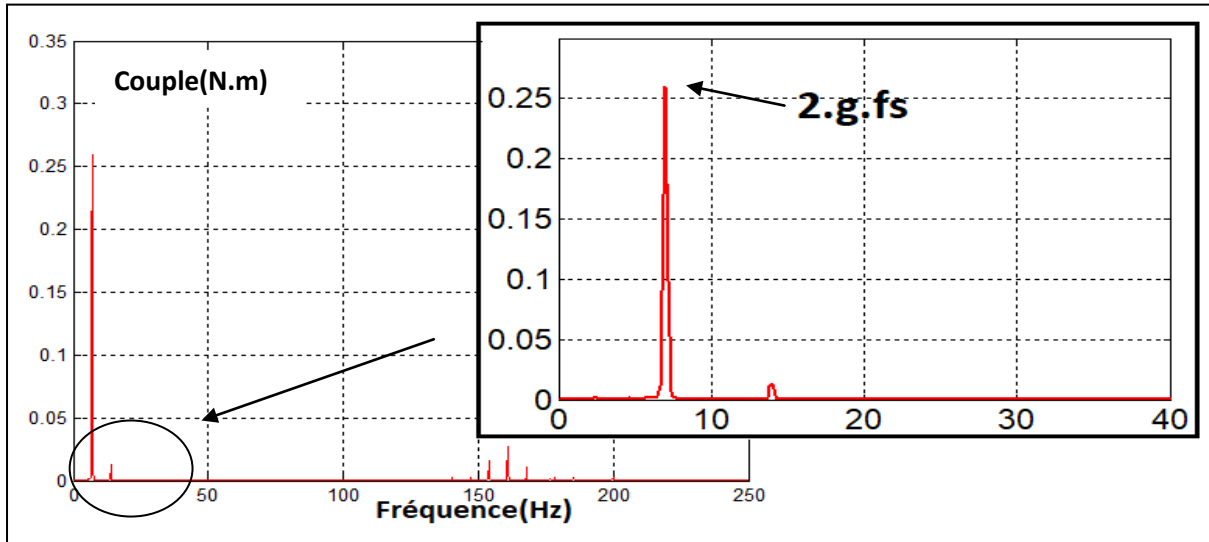


Figure IV.30. Spectre du couple utile d'une machine défaillante avec $Cr=12N.m$.

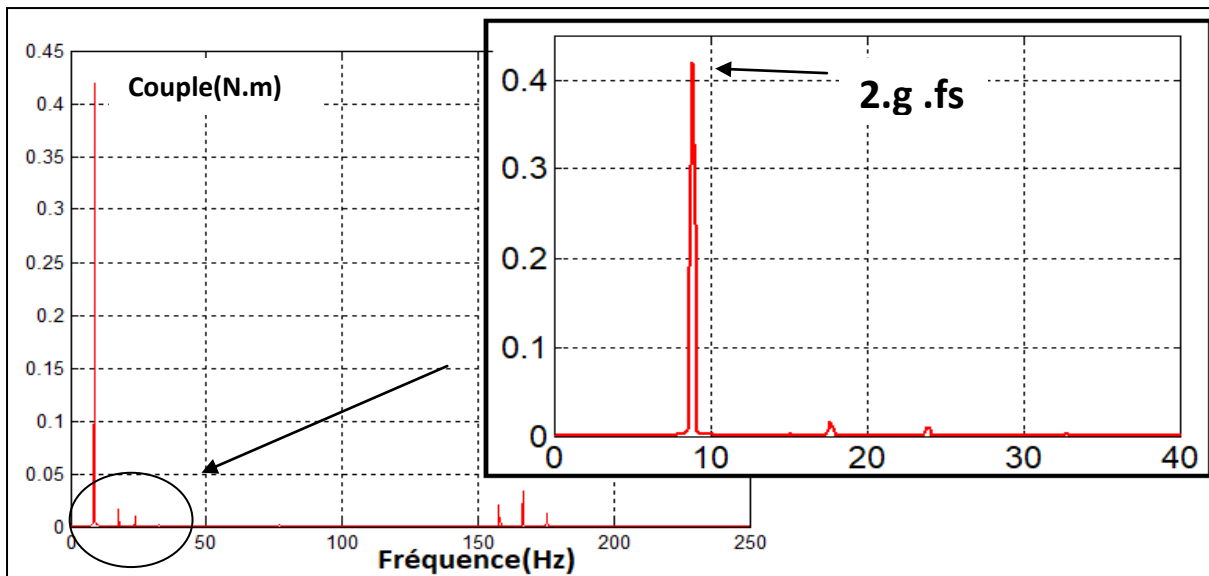


Figure IV.31. Spectre du couple utile d'une machine défaillante avec $Cr=15N.m$.

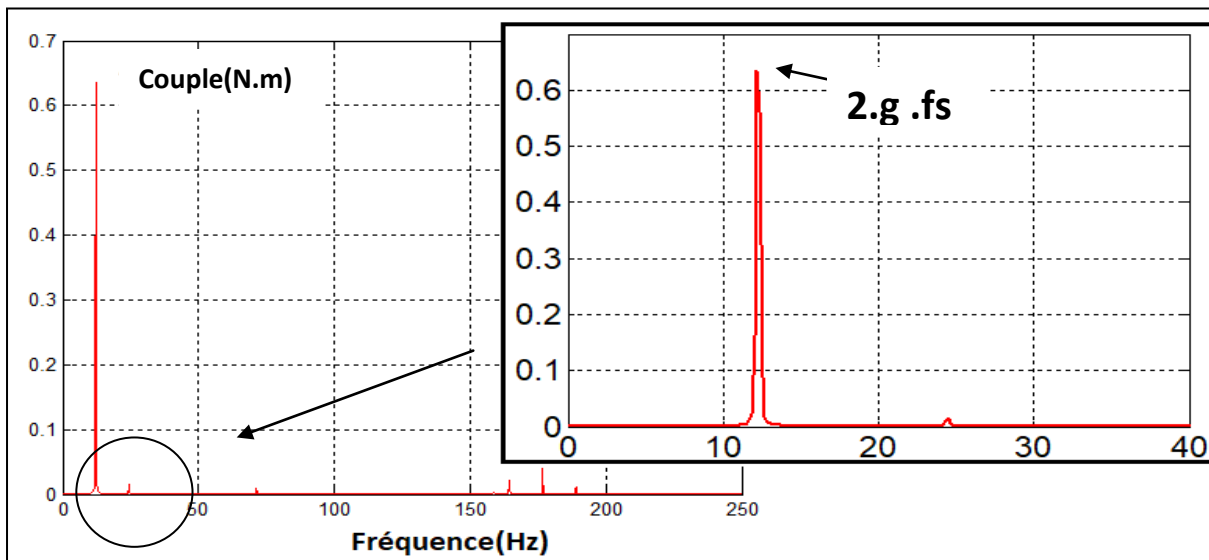


Figure IV.32. Spectre du couple utile d'une machine défaillante avec $Cr=20N.m$.

- Les spectres de la vitesse de rotation

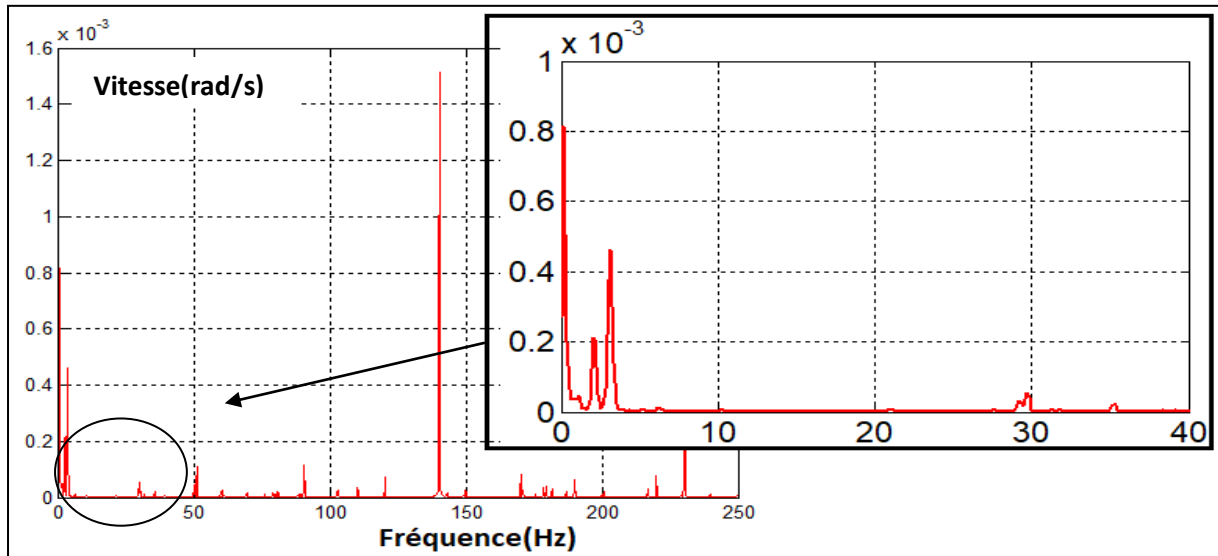


Figure IV.33. Spectre de la vitesse de rotation d'une machine défailante à vide.

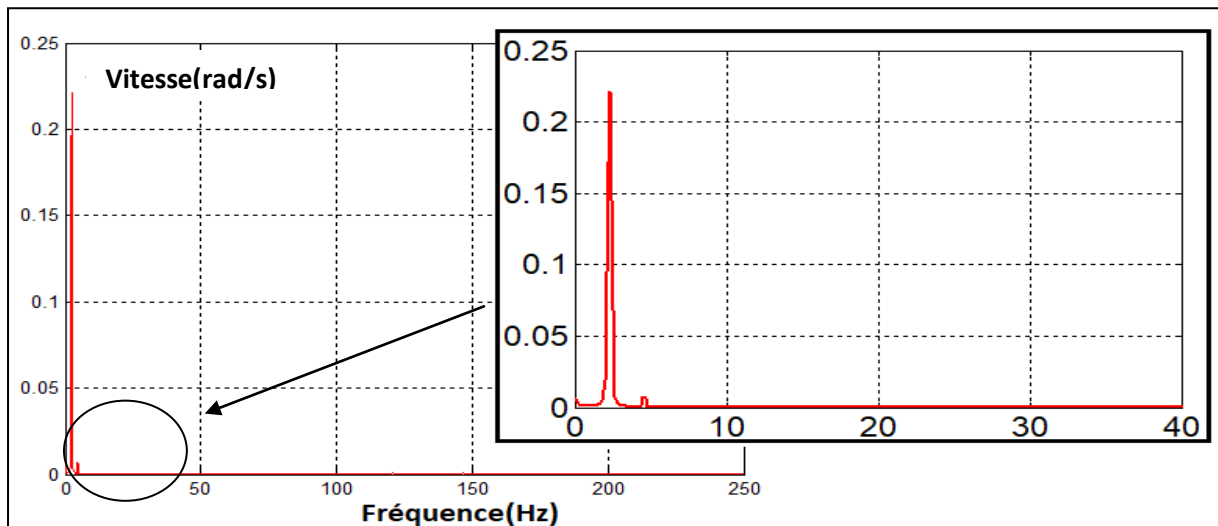


Figure IV.34. Spectre de la vitesse de rotation d'une machine défailante pour $Cr=4N.m$.

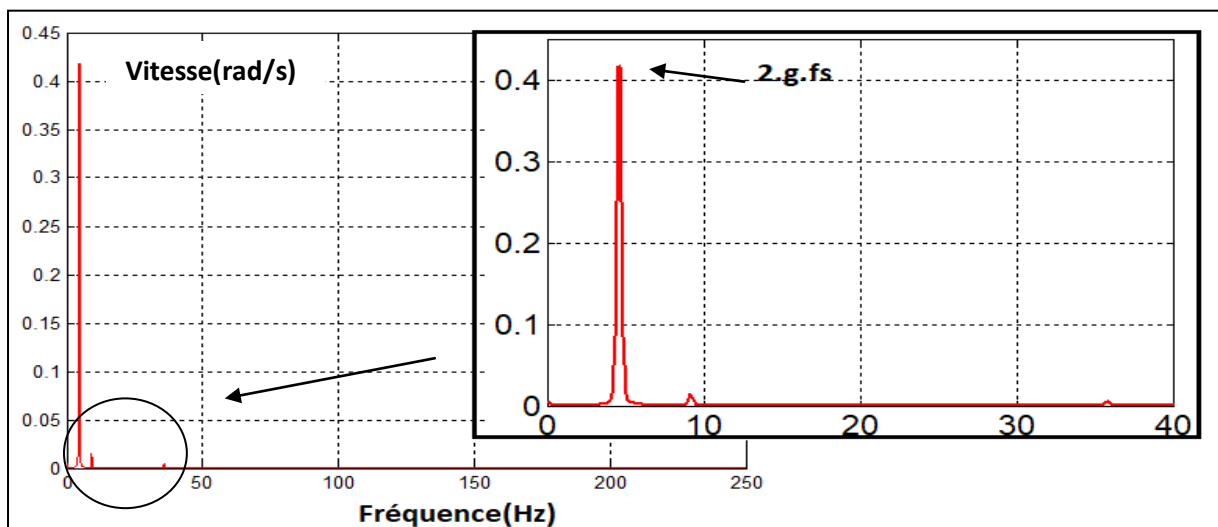


Figure IV.35. Spectre de la vitesse de rotation d'une machine défailante pour $Cr=8N.m$.

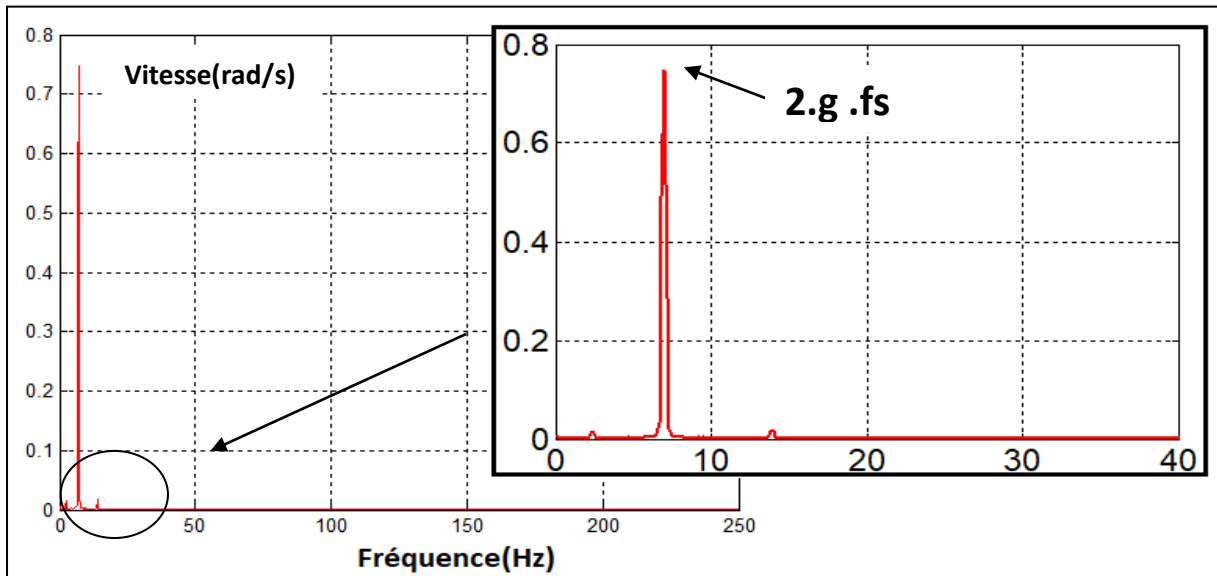


Figure IV.36. Spectre de la vitesse de rotation d'une machine défaillante pour $Cr=12N.m$.

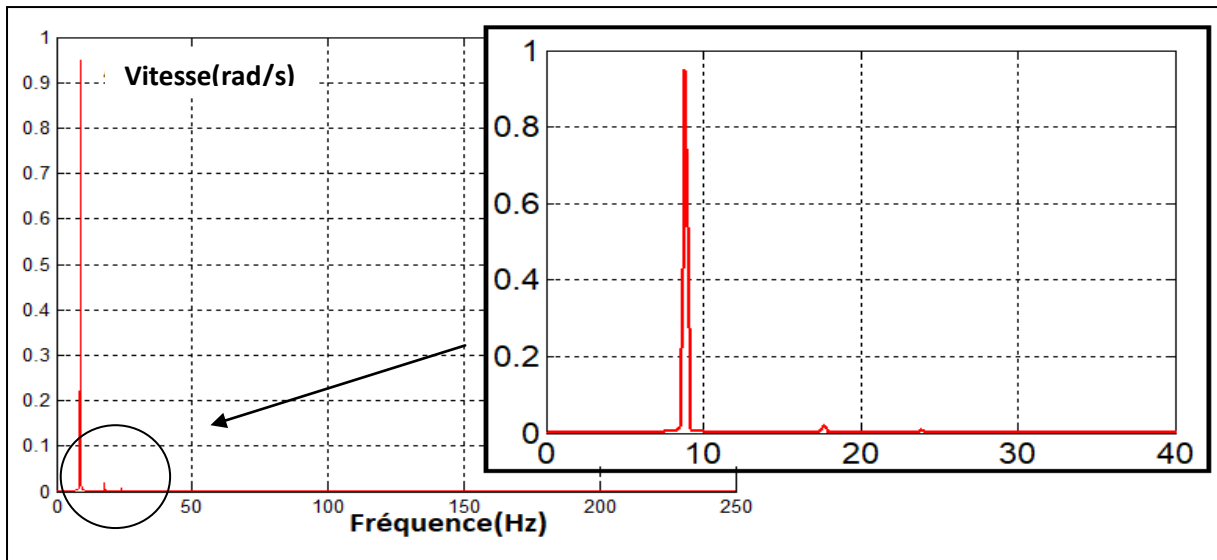


Figure IV.37. Spectre de la vitesse de rotation d'une machine défaillante pour $Cr=15N.m$.

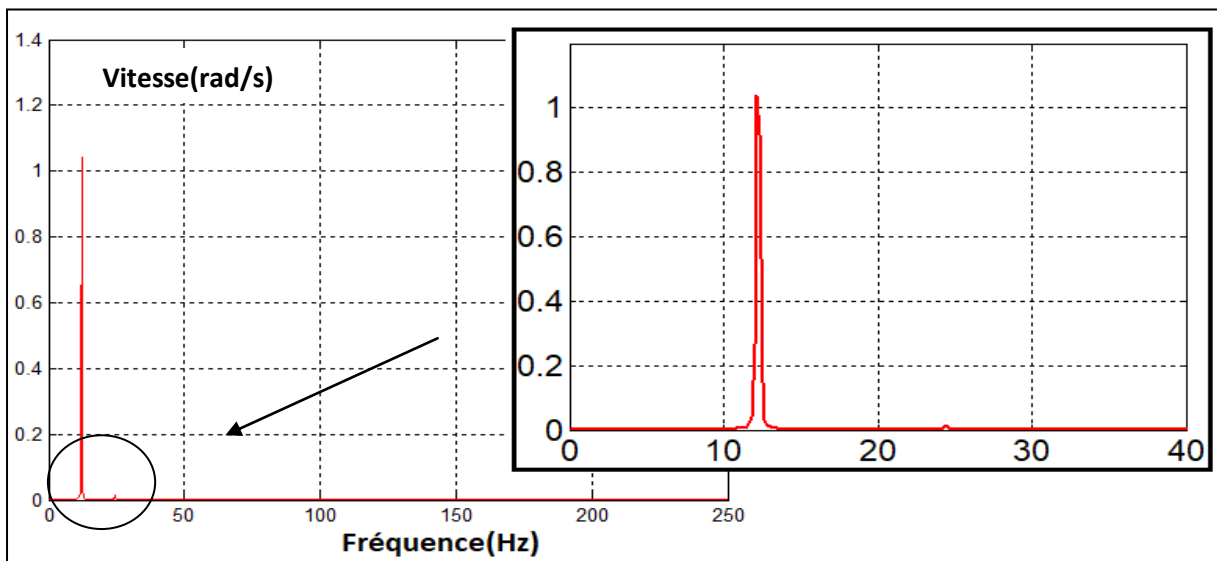


Figure IV.38. Spectre de la vitesse de rotation d'une machine défaillante pour $Cr=20N.m$.

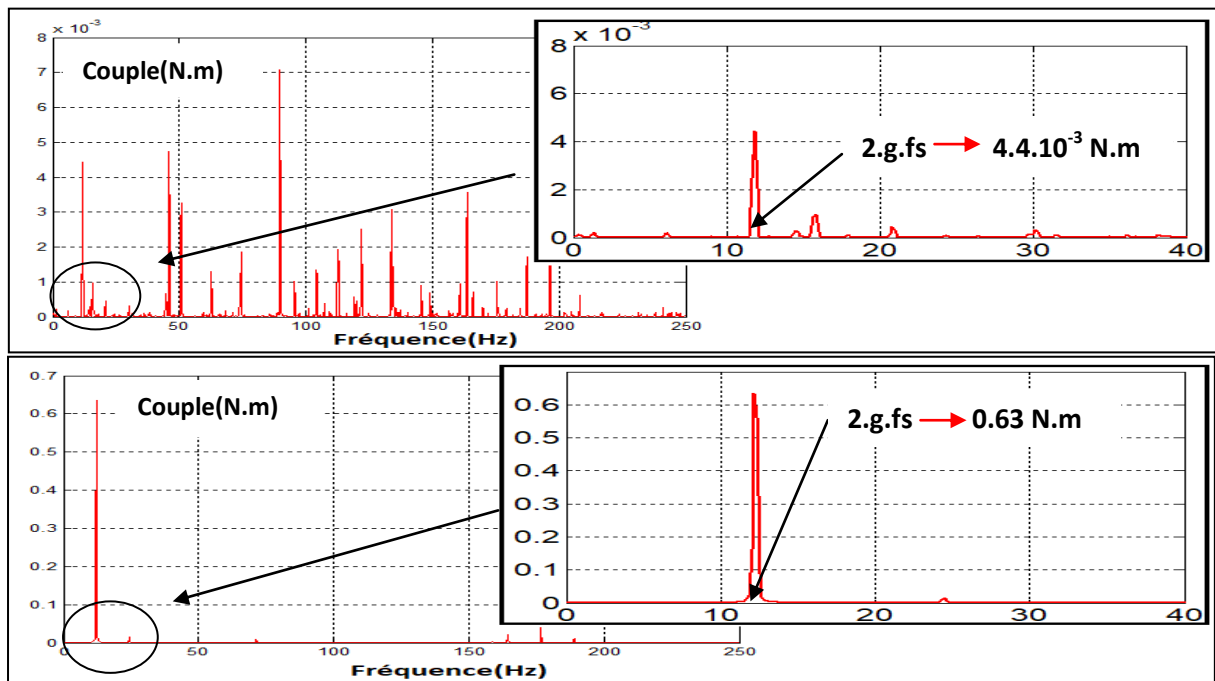


Figure IV.39 (a-b). Spectre du couple utile d'une machine saine et défaillante respectivement en pleine charge.

IV.4.4. Interprétation

Pour une seule barre cassée, les figures IV (27-32) représentent les spectres du couple utile pour différentes valeurs de la charge (à vide, 4, 8, 12, 15, 20) N.m. Dans le cas où la machine défaillante est à vide on remarque qu'il est difficile d'observer les harmoniques à la fréquence 2.g.fs. Par contre en charge, on voit bien des harmoniques d'amplitudes 0.025 N.m et 0.095 N.m et 0.26 N.m et 0.419 N.m et 0.636 N.m pour des fréquences de 2.25 Hz et 4.75 Hz et 7 Hz et 8.75 Hz et 12.25 Hz respectivement. Donc on peut dire que l'augmentation de la charge conduit à une augmentation de l'amplitude des harmoniques qui sont des signatures de défaut de cassure de barre dans la machine étudié.

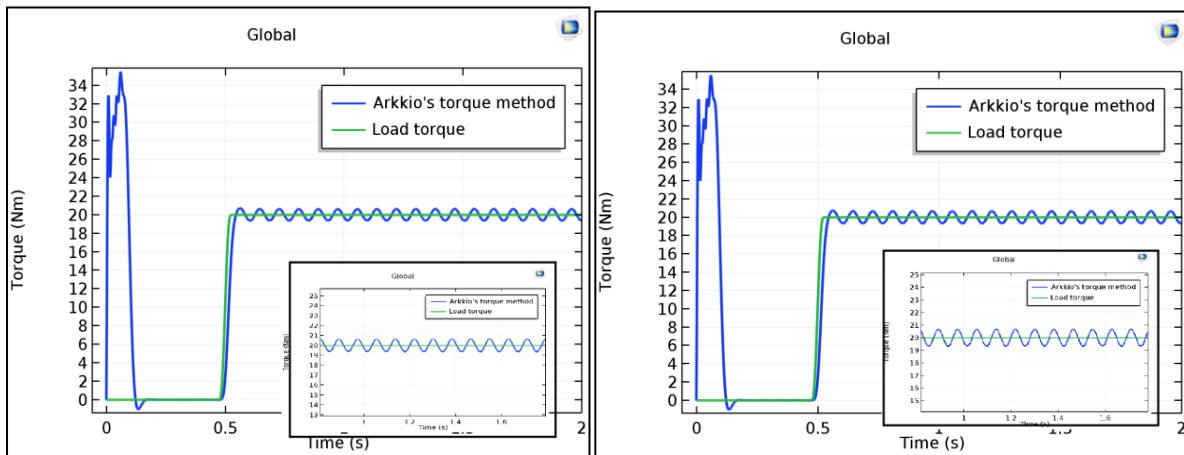
Les figures IV (33-38) représentent les spectres de la vitesse de rotation pour différentes valeurs de la charge (à vide, 4, 8, 12, 15, 20) N.m. On remarque aussi que le spectre de couple donne des informations plus claires et plus visibles que celles données par le spectre de la vitesse, car l'amplitude des oscillations dans l'allure de la vitesse est très faible.

La figure IV.39 présente une comparaison entre le spectre du couple utile d'une machine saine et défaillante en pleine charge. Cette figure montre l'apparition des harmoniques aux multiples de fréquence 2.g.fs dans le spectre du couple développé par la machine asynchrone défaillante (une seule barre cassée). Au contraire ces harmoniques n'apparaissent pas dans le cas

de la machine saine. On peut dire que les harmoniques dans l'allure de couple sont des signes de défaut de cassure de barre dans le rotor de la machine étudié.

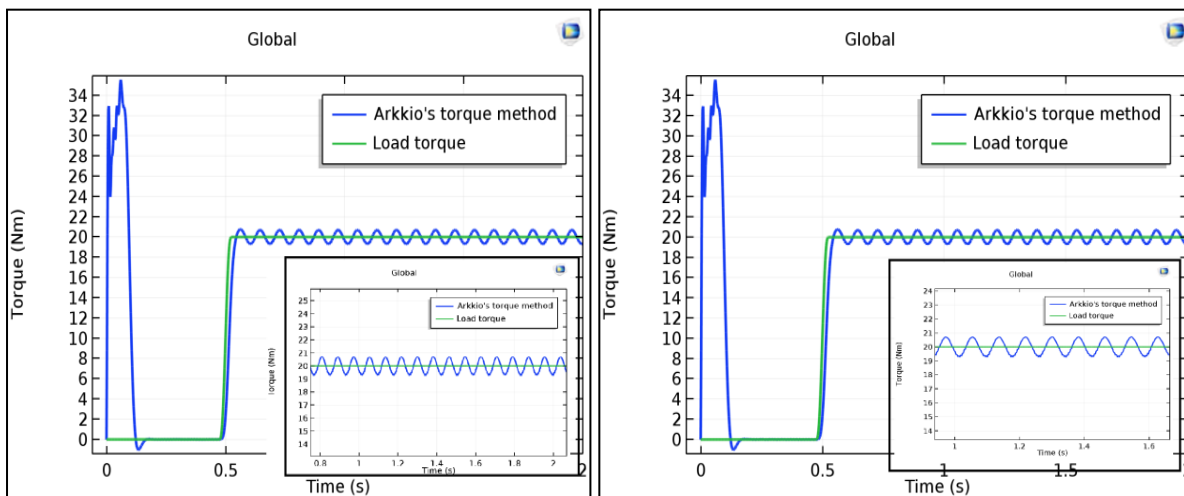
IV.4.5. Influence de la variation de la valeur de conductivité électrique σ

Dans cette partie, nous proposons de faire varier la résistance de la barre rotorique causée par la variation de la conductivité électrique de cette barre. Les figures IV.40 (a-j) représentent la variation instantanée de couple utile d'une machine défaillante en pleine charge pour différentes valeurs de conductivité électrique σ . Les figures IV.41 (a-j) représentent la variation instantanée de vitesse de rotation d'une machine défaillante en pleine charge pour différentes valeurs de conductivité électrique σ .



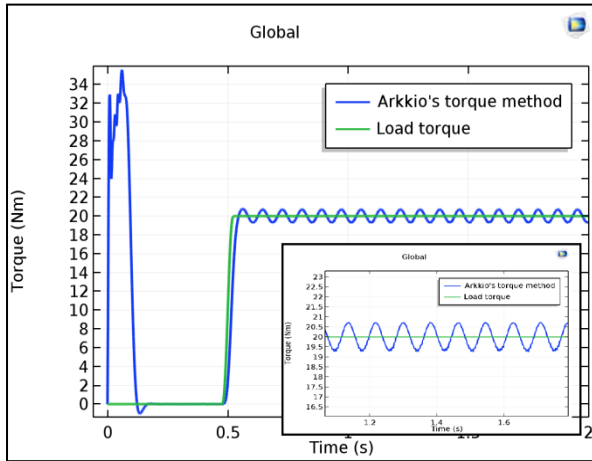
$$(a) \sigma = \frac{3.72 \cdot 10^7}{10} = 3.72 \cdot 10^6$$

$$(b) \sigma = \frac{3.72 \cdot 10^7}{20} = 1.86 \cdot 10^6$$

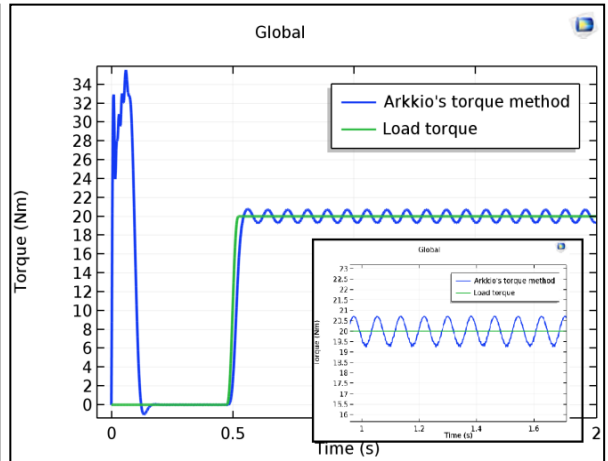


$$(c) \sigma = \frac{3.72 \cdot 10^7}{30} = 1.24 \cdot 10^6$$

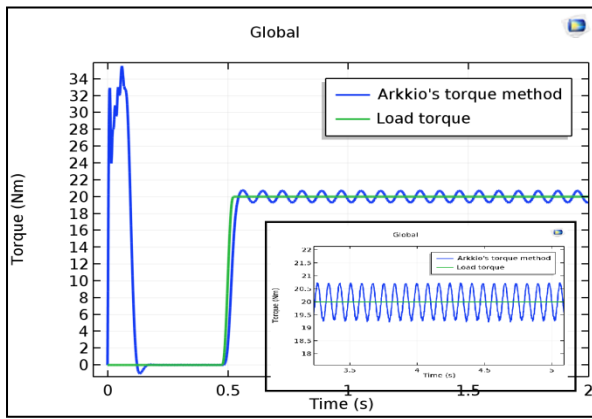
$$(d) \sigma = \frac{3.72 \cdot 10^7}{40} = 9.3 \cdot 10^5$$



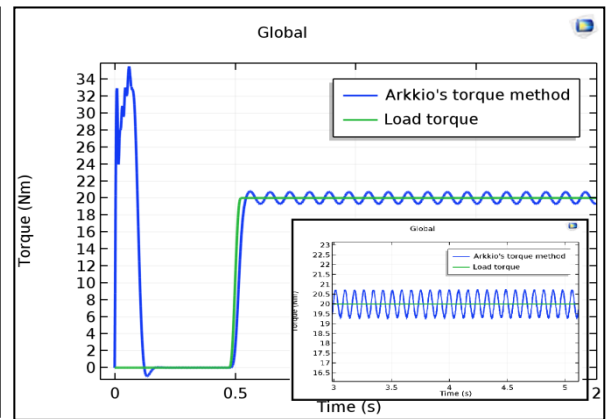
$$(e) \sigma = \frac{3.72 \cdot 10^7}{50} = 7.4 \cdot 10^5$$



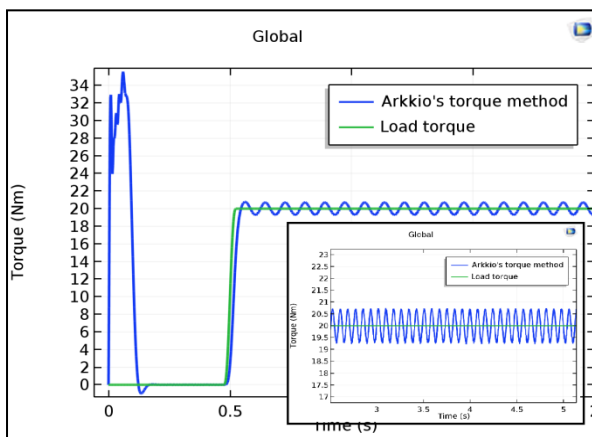
$$(f) \sigma = \frac{3.72 \cdot 10^7}{60} = 6.2 \cdot 10^5$$



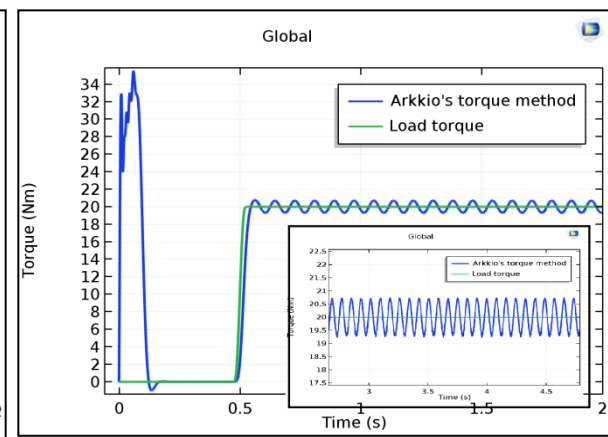
$$(g) \sigma = \frac{3.72 \cdot 10^7}{70} = 5.314 \cdot 10^5$$



$$(h) \sigma = \frac{3.72 \cdot 10^7}{80} = 4.65 \cdot 10^5$$

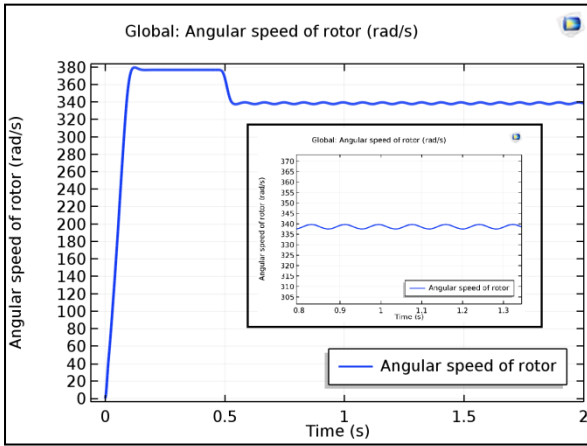


$$(i) \sigma = \frac{3.72 \cdot 10^7}{90} = 4.133 \cdot 10^5$$

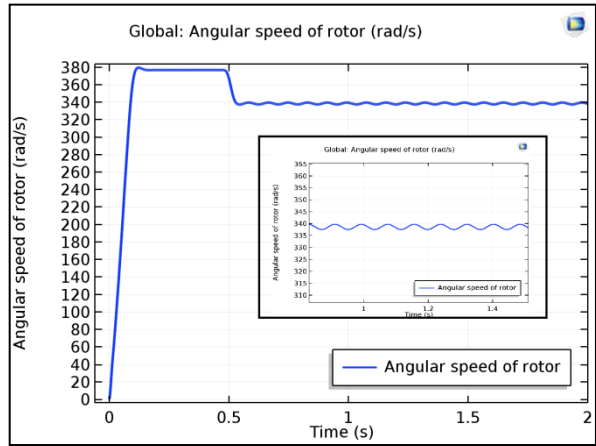


$$(j) \sigma = \frac{3.72 \cdot 10^7}{100} = 3.72 \cdot 10^5$$

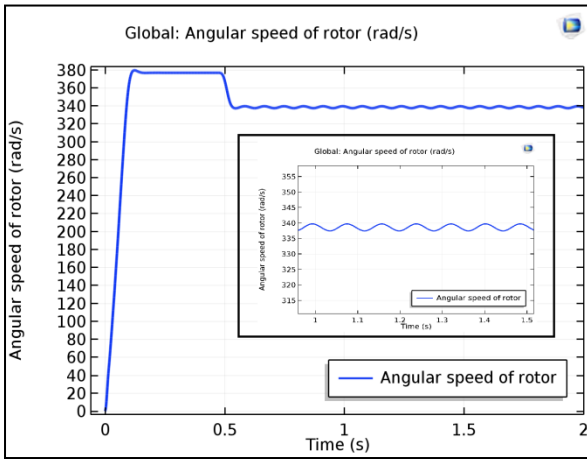
Figure IV. 40. (a-j) La variation instantanée de couple utile d'une machine défaillante en pleine charge pour différents valeur de conductivité électrique σ



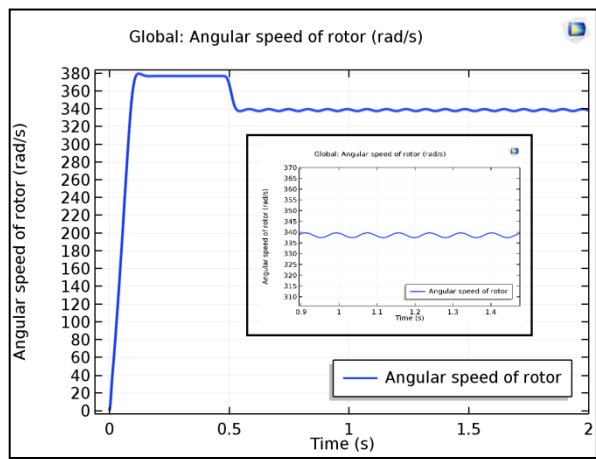
$$(a) \sigma = \frac{3.72 \cdot 10^7}{10} = 3.72 \cdot 10^6$$



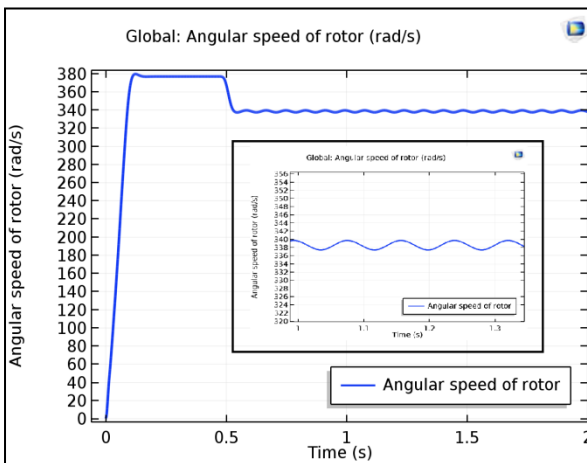
$$(b) \sigma = \frac{3.72 \cdot 10^7}{20} = 1.86 \cdot 10^6$$



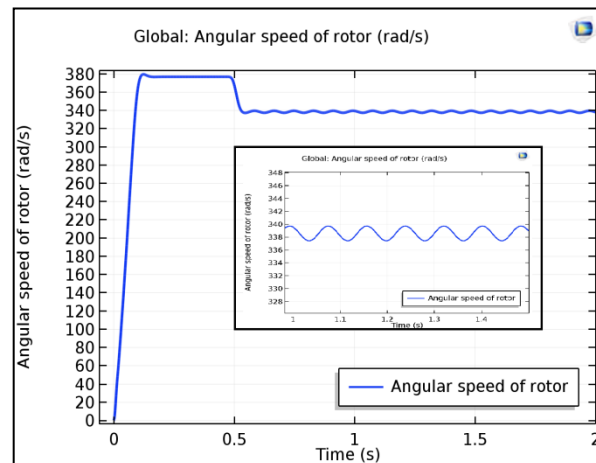
$$(c) \sigma = \frac{3.72 \cdot 10^7}{30} = 1.24 \cdot 10^6$$



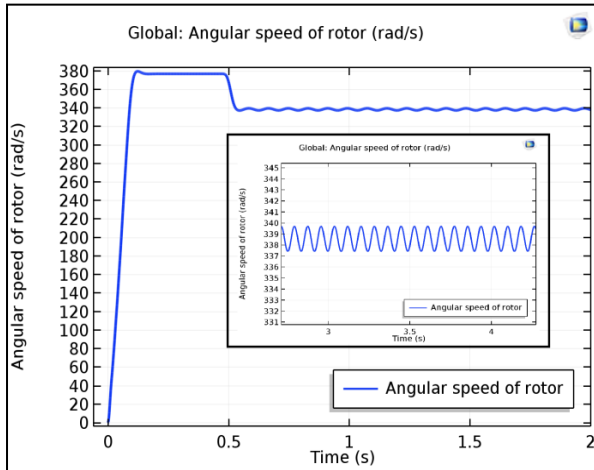
$$(d) \sigma = \frac{3.72 \cdot 10^7}{40} = 9.3 \cdot 10^5$$



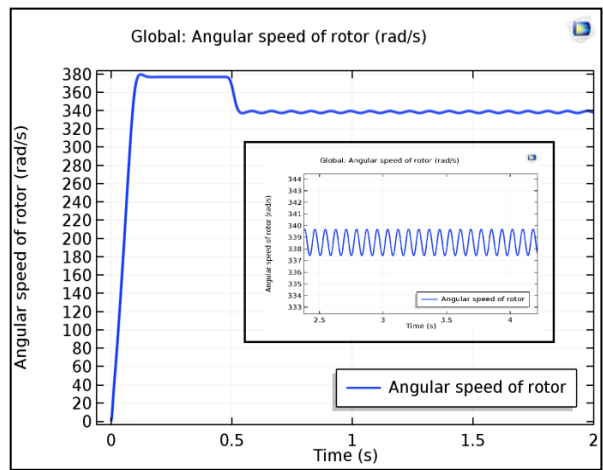
$$(e) \sigma = \frac{3.72 \cdot 10^7}{50} = 7.4 \cdot 10^5$$



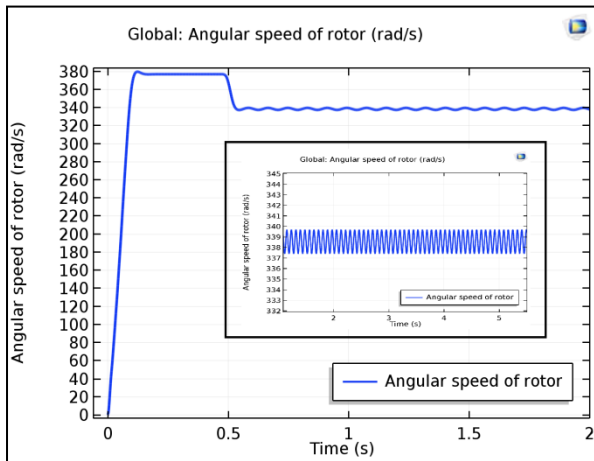
$$(f) \sigma = \frac{3.72 \cdot 10^7}{60} = 6.2 \cdot 10^5$$



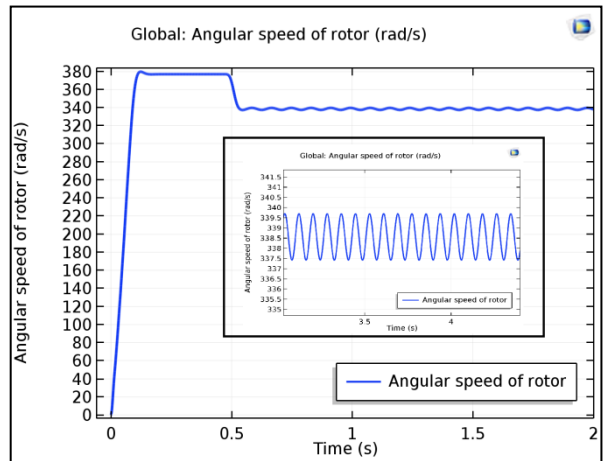
$$(g) \sigma = \frac{3.72 \cdot 10^7}{70} = 5.314 \cdot 10^5$$



$$(h) \sigma = \frac{3.72 \cdot 10^7}{80} = 4.65 \cdot 10^5$$



$$(i) \sigma = \frac{3.72 \cdot 10^7}{90} = 4.133 \cdot 10^5$$



$$(j) \sigma = \frac{3.72 \cdot 10^7}{100} = 3.72 \cdot 10^5$$

Figure IV.41. (a-j) La variation instantanée de la vitesse de rotation d’une machine défaillante en pleine charge pour différents valeur de conductivité électrique σ

IV.4.5.1. Interprétation

D’après les résultats obtenus nous remarquons qu’il y a une perturbation dans l’allure de couple en régime permanent. Cette perturbation devient importante, lorsque la résistance de la barre augmente 100 fois. Par contre, la vitesse de rotation est moins influencée par l’augmentation de la résistance, il y a une faible perturbation dans l’allure de vitesse.

IV.4.5.2. Etude spectrale de l'influence de variation de sigma

- Les spectres de couple utile

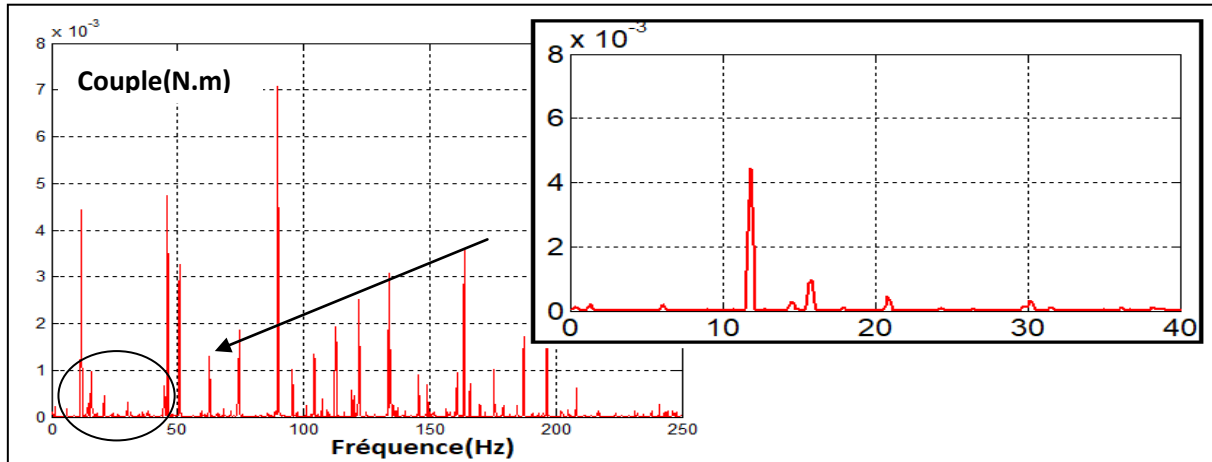


Figure IV.42. Spectre du couple utile pour une machine saine en plein charge $\sigma=3.72.10^7$.

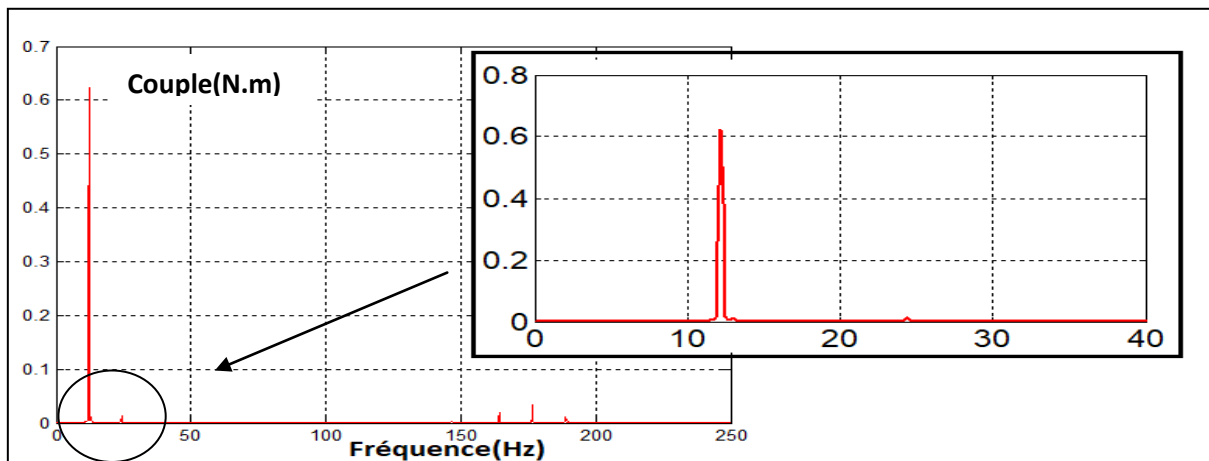


Figure IV.43. Spectre du couple utile pour une machine défaillante en plein charge $\sigma=3.72.10^6$

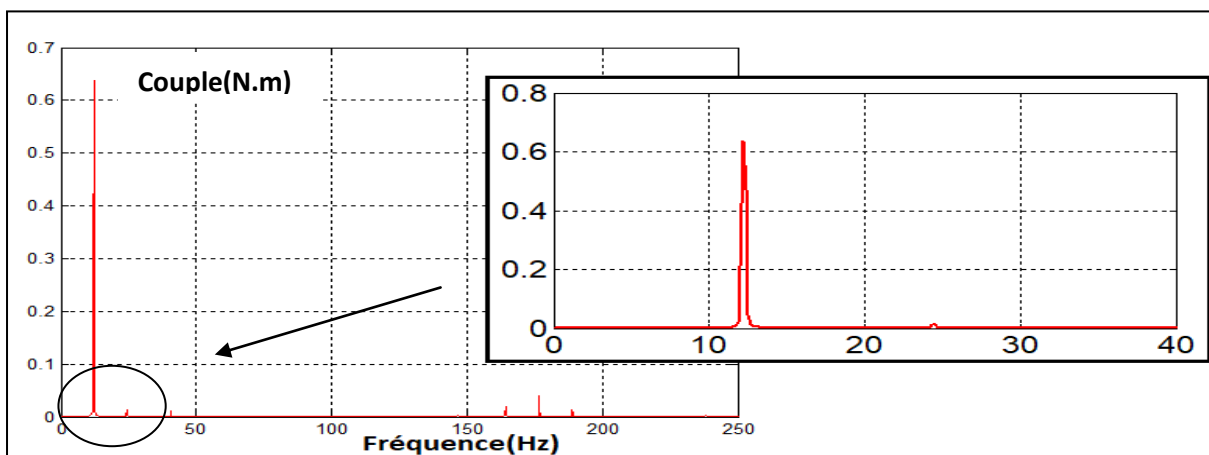


Figure IV.44. Spectre du couple utile pour une machine défaillante en plein charge $\sigma=1.86.10^6$

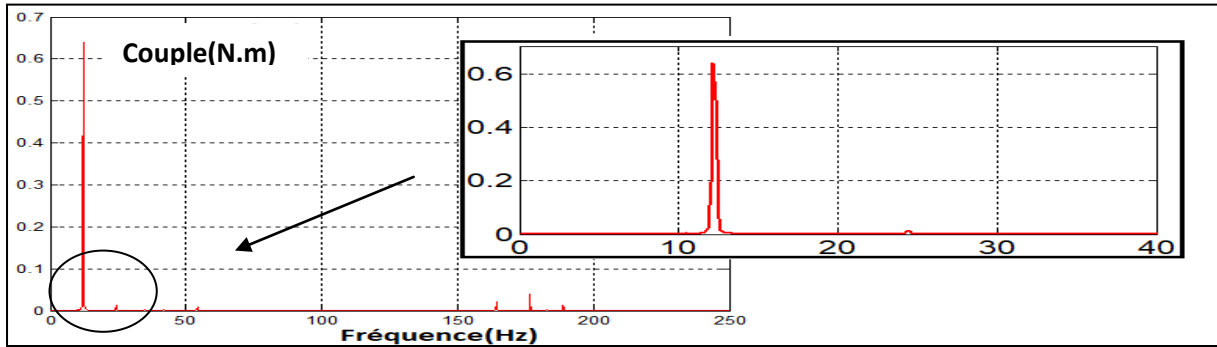


Figure IV.45. Spectre du couple utile pour une machine défaillante en plein charge

$$\sigma = 1.24 \cdot 10^6$$

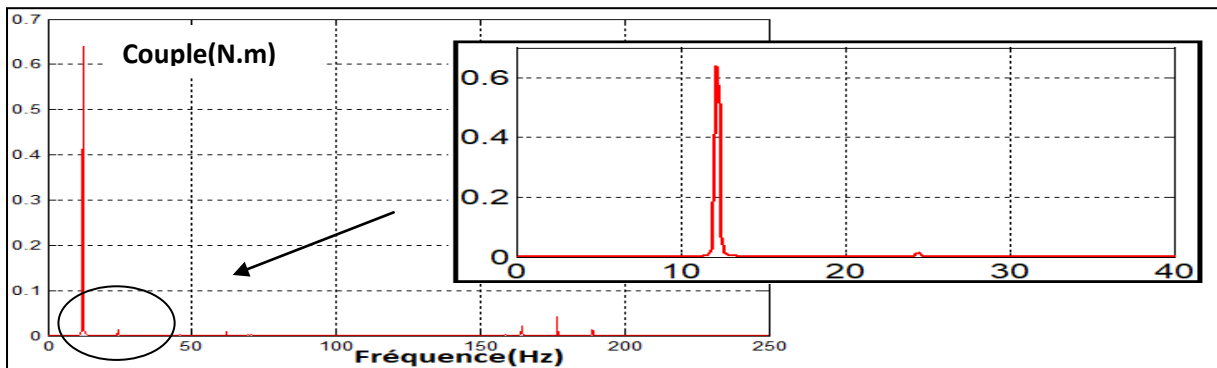


Figure IV.46. Spectre du couple utile pour une machine défaillante en plein charge

$$\sigma = 9.3 \cdot 10^5$$

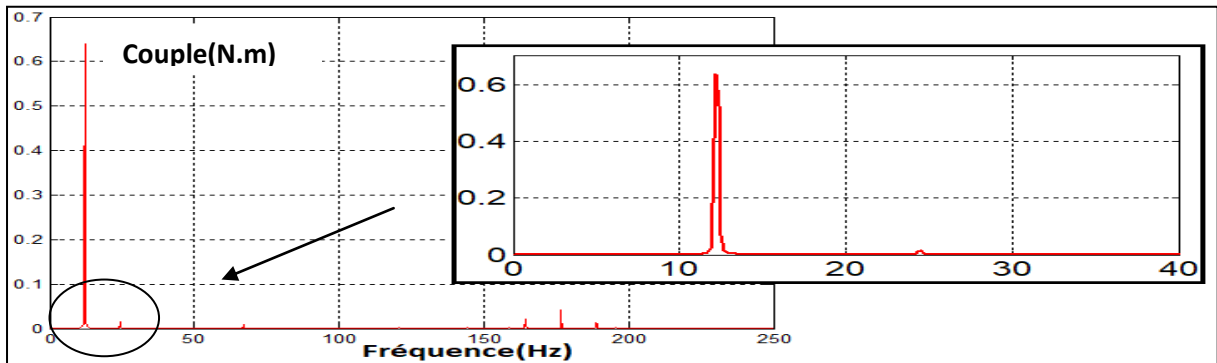


Figure IV.47. Spectre du couple utile pour une machine défaillante en plein charge

$$\sigma = 7.4 \cdot 10^5$$

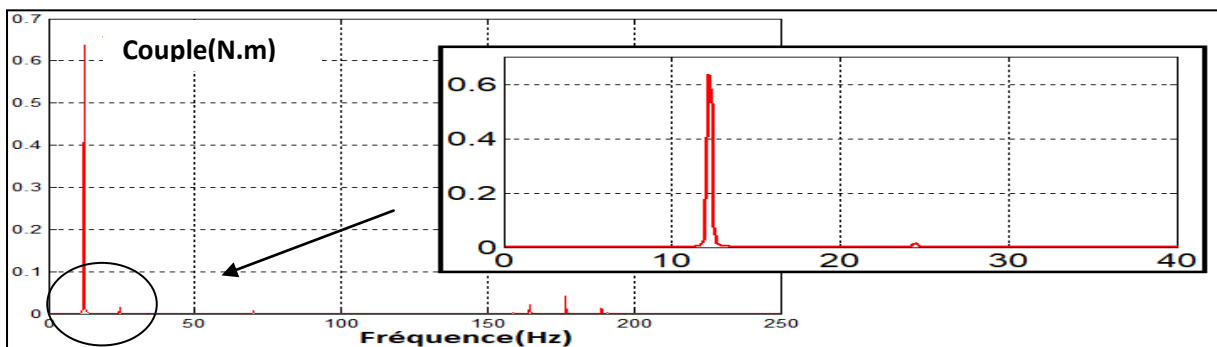


Figure IV.48. Spectre du couple utile pour une machine défaillante en plein charge

$$\sigma = 6.2 \cdot 10^5$$

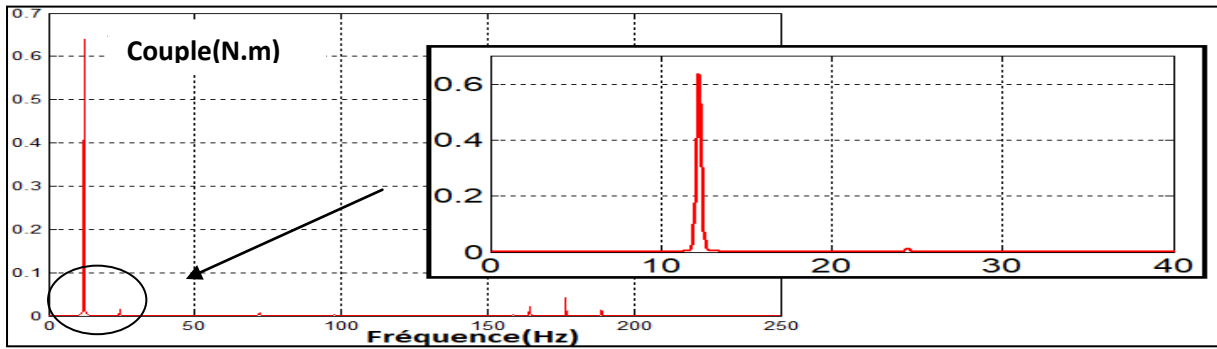


Figure IV.49. Spectre du couple utile pour une machine défaillante en plein charge

$$\sigma=5.314.10^5$$

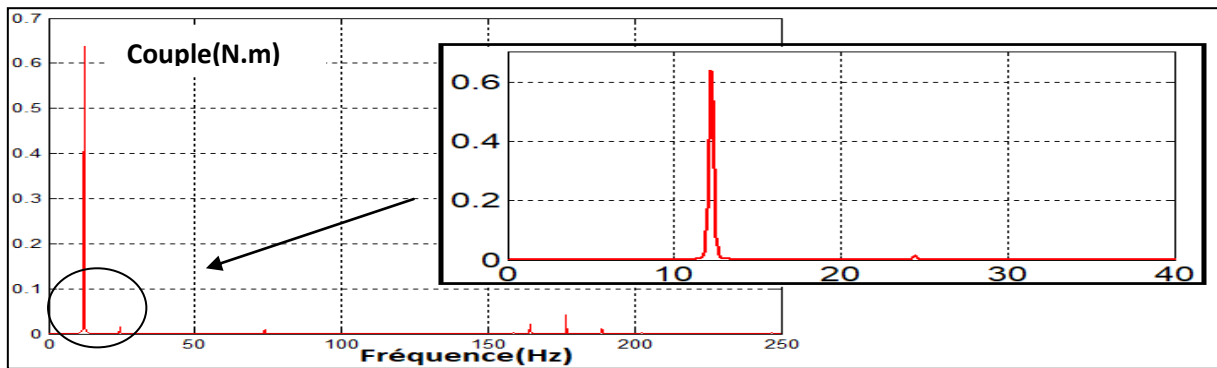


Figure IV.50. Spectre du couple utile pour une machine défaillante en plein charge

$$\sigma=4.65.10^5$$

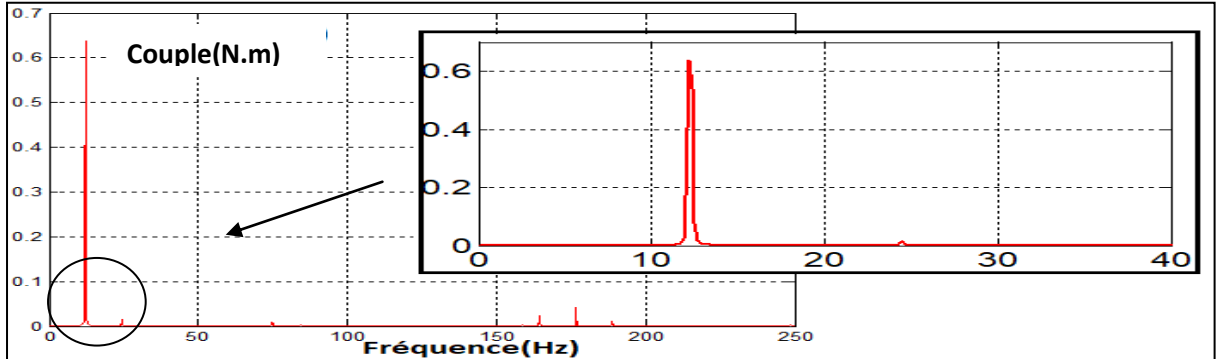


Figure IV.51. Spectre du couple utile pour une machine défaillante en plein charge

$$\sigma=4.133.10^5$$

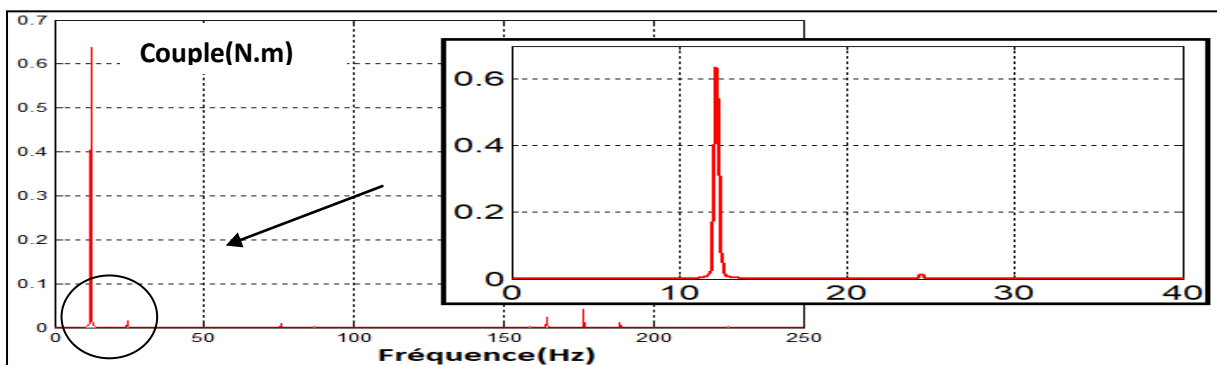
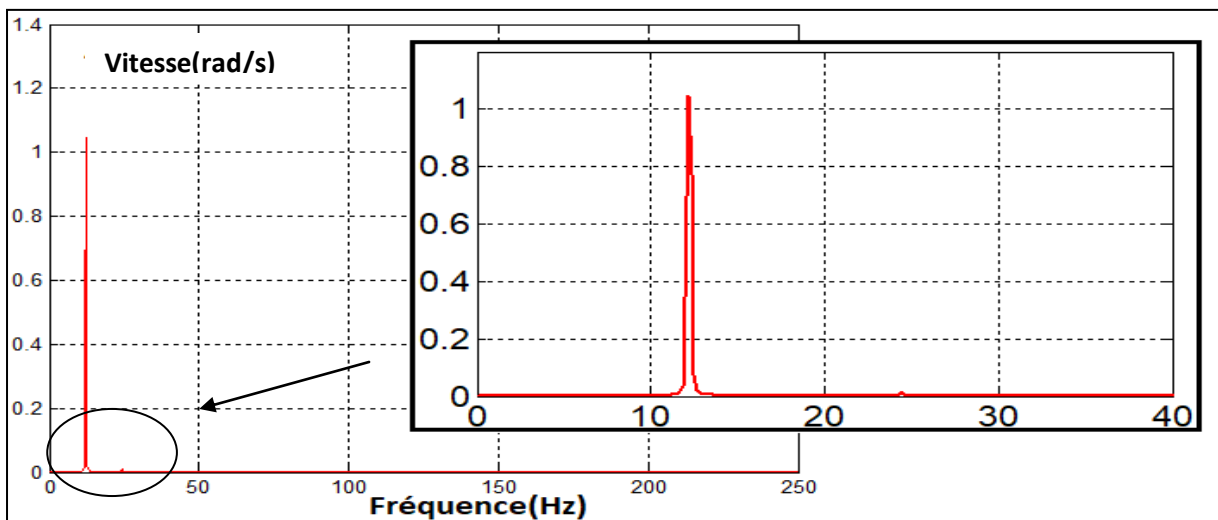
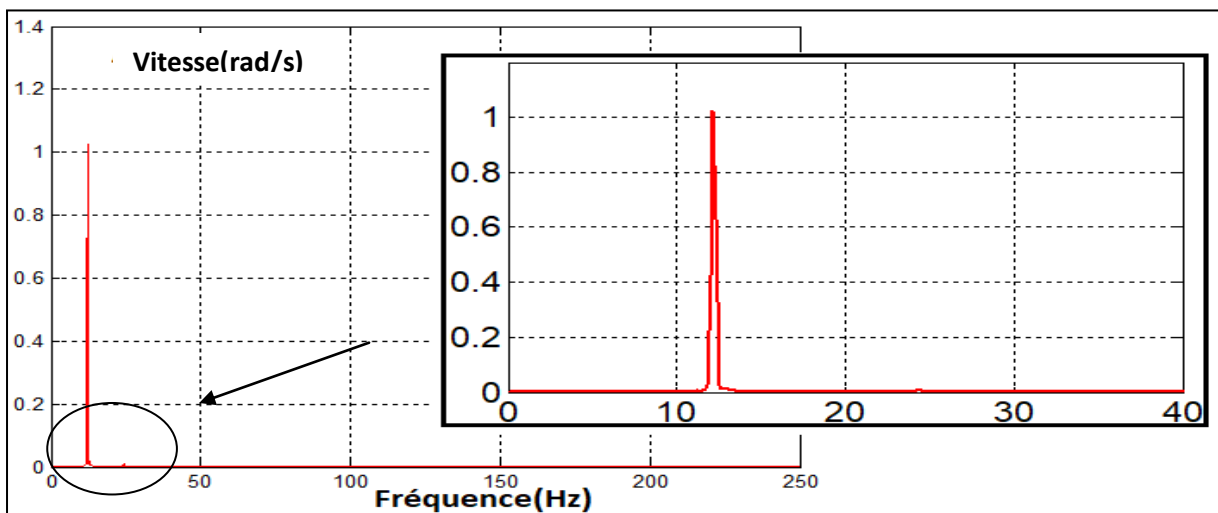
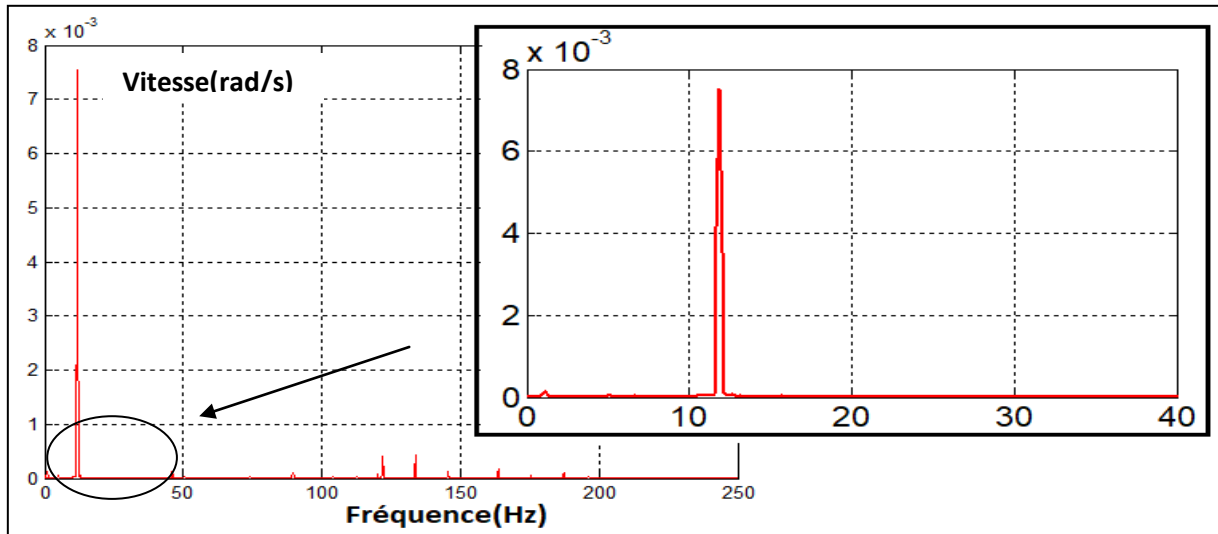


Figure IV.52. Spectre du couple utile pour une machine défaillante en plein charge

$$\sigma=3.72.10^5$$

- Les spectres de la vitesse de rotation



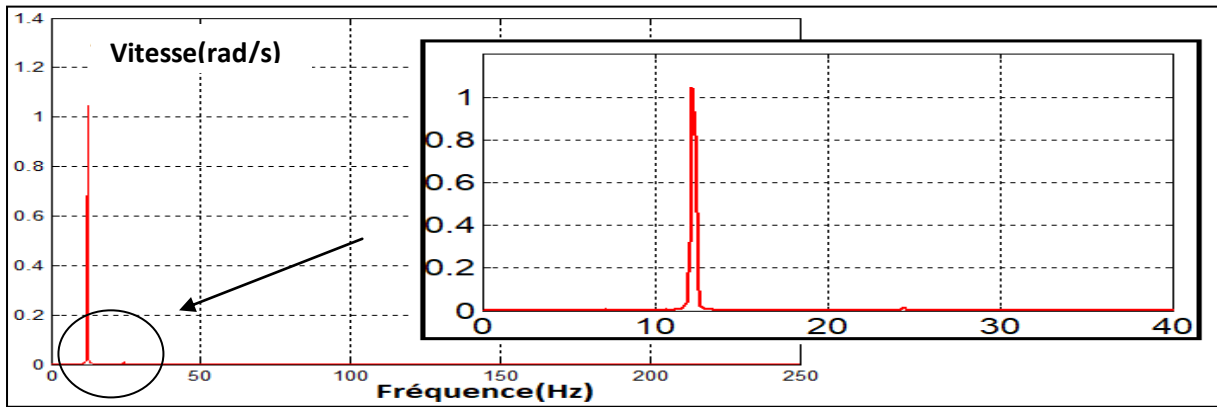


Figure IV.56. Spectre de la vitesse de rotation pour une machine en plein charge $\sigma=1.24.10^6$

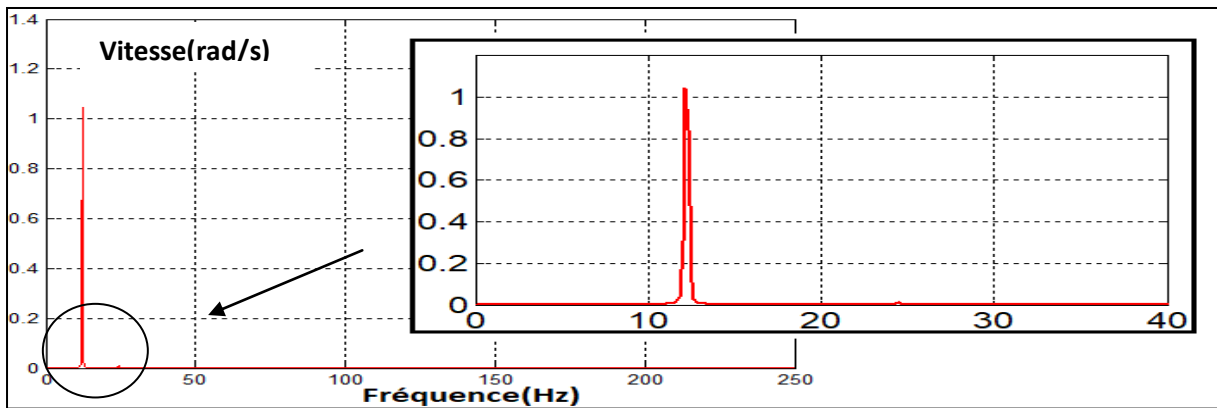


Figure IV.57. Spectre de la vitesse de rotation pour une machine en plein charge $\sigma=9.3.10^5$

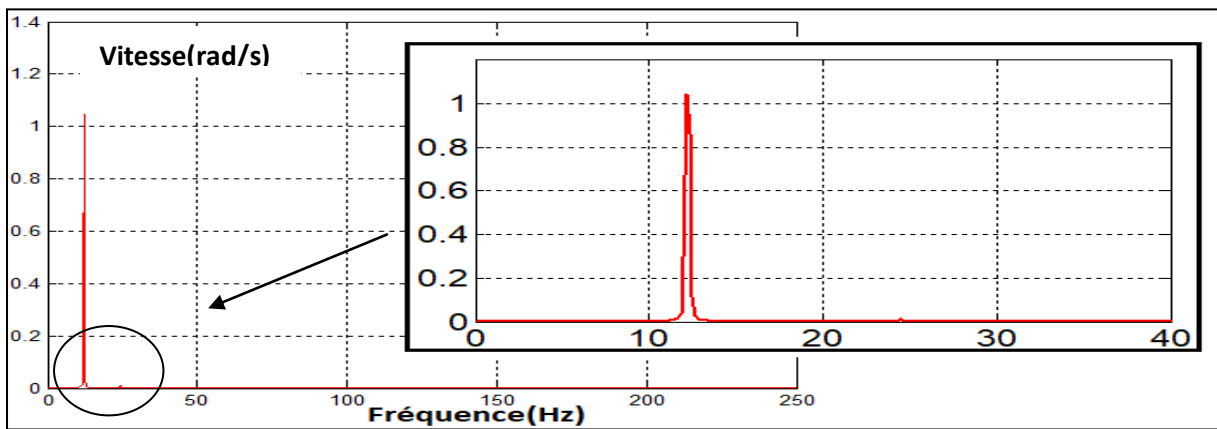


Figure IV.58. Spectre de la vitesse de rotation pour une machine en plein charge $\sigma=7.4.10^5$

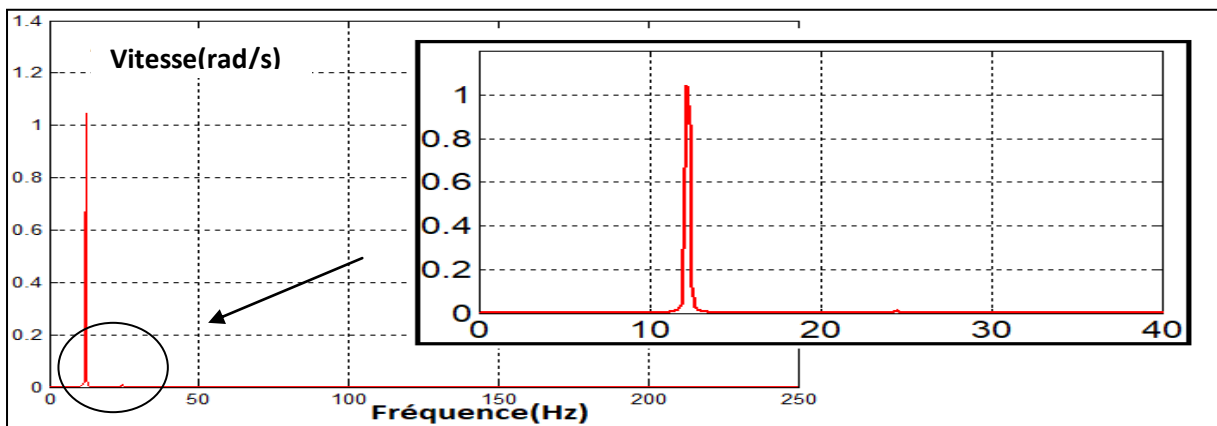


Figure IV.59. Spectre de la vitesse de rotation pour une machine en plein charge $\sigma=6.2.10^5$

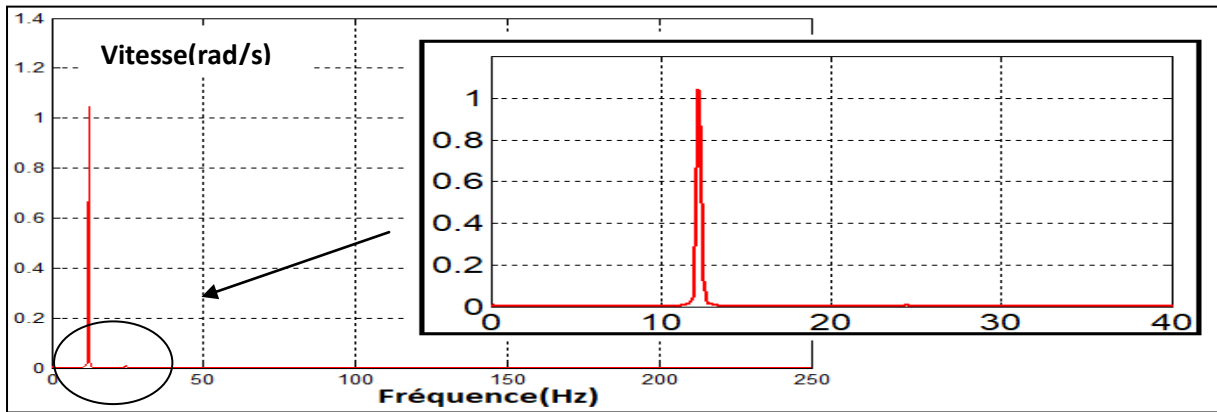


Figure IV.60. Spectre de la vitesse de rotation pour une machine en plein charge $\sigma=5.314.10^5$

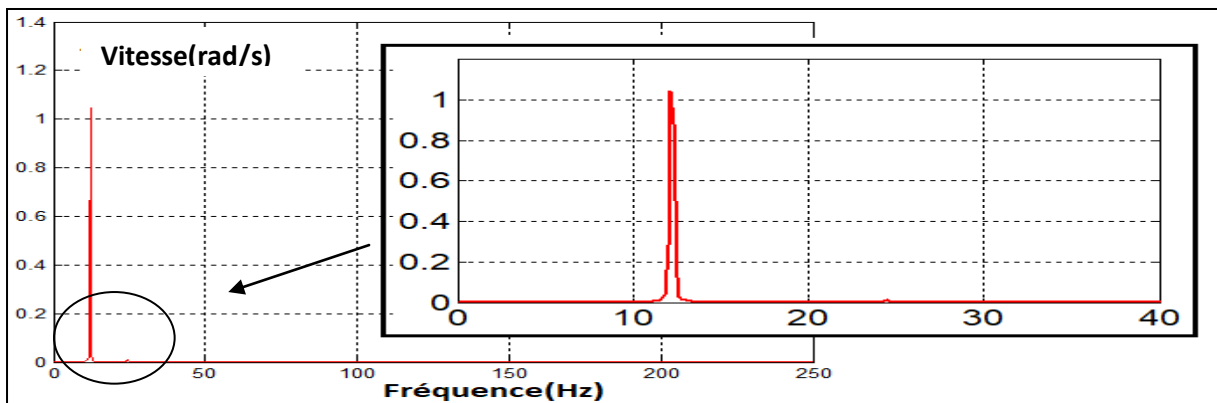


Figure IV.61. Spectre de la vitesse de rotation pour une machine en plein charge $\sigma=4.65.10^5$

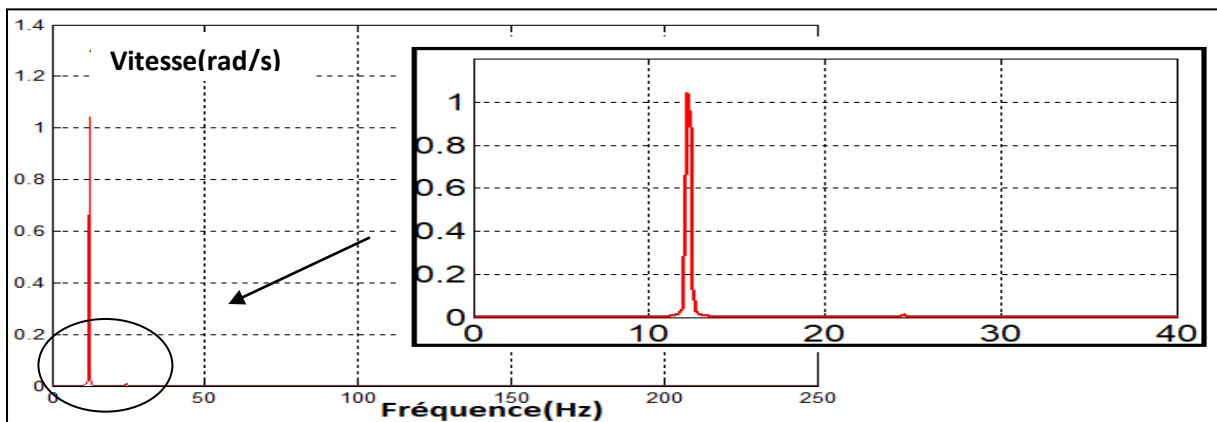


Figure IV.62. Spectre de la vitesse de rotation pour une machine en plein charge $\sigma=4.133.10^5$

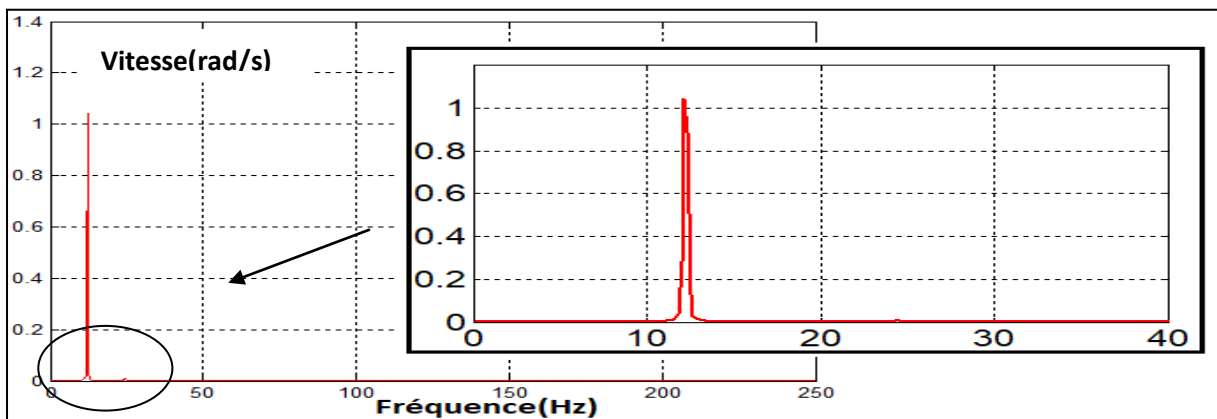


Figure IV.63. Spectre de la vitesse de rotation pour une machine en plein charge $\sigma=3.72.10^5$

IV.4.5.3. Interprétation

La figure IV.42 représente le spectre du couple utile à l'état sain. Les figures IV. (42-52) représentent le spectre du couple utile de la machine défaillante avec une cassure barre pour différents valeur de conductivité électrique ($3.72.10^6$, $1.86.10^6$, $1.24.10^6$, $9.3.10^5$, $7.4.10^5$, $6.2.10^5$, $5.314.10^5$, $4.65.10^5$, $4.133.10^5$, $3.72.10^5$) [S/m] respectivement.

Nous constatons une légère augmentation de l'amplitude de la composante fréquentielle 2.g.fs à chaque multiplication de la résistance de la barre.

En somme, nous ne concluons que la variation de la conductivité électrique ou la résistance de la barre à une grande influence sur l'amplitude de la composante fréquentielle 2.g.fs.

IV.5. Application N° 3 : Modélisation et simulation de la machine asynchrone triphasée à cage avec un défaut de deux barres cassées

Dans cette partie de chapitre, nous modélisons une machine asynchrone avec un défaut de deux cassures de barres

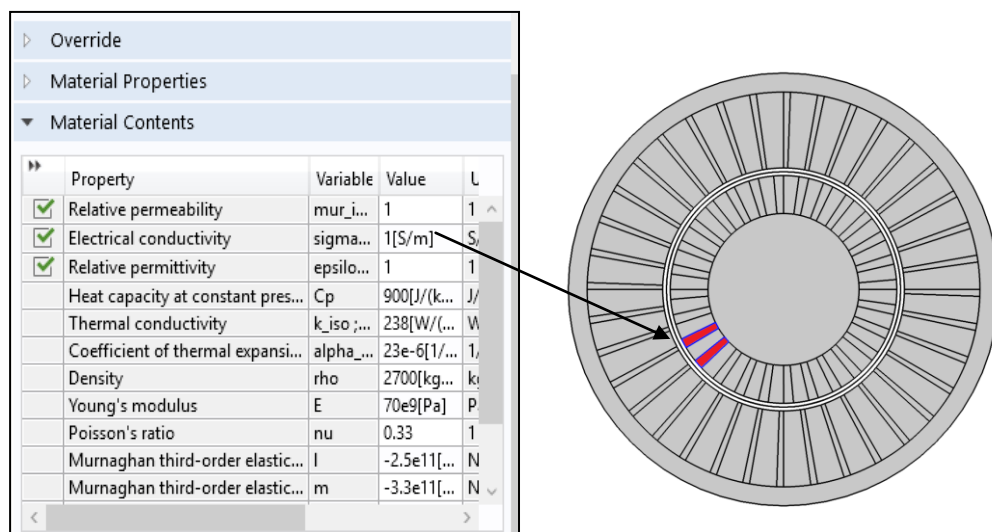


Figure IV.64. Le cassure de 2 barres dans logiciel COMSOL-Multiphysics

IV.5.1. Résultats de simulation

Les figures IV.65 (a-c) représentent respectivement le couple utile en pleine charge d'une machine saine, défaillante avec une barre cassée et défaillante avec deux barres cassées.

Les figures IV.66 (a-c) représentent respectivement la vitesse de rotation en pleine charge d'une machine saine, défaillante avec une barre cassée et défaillante avec deux barres cassées.

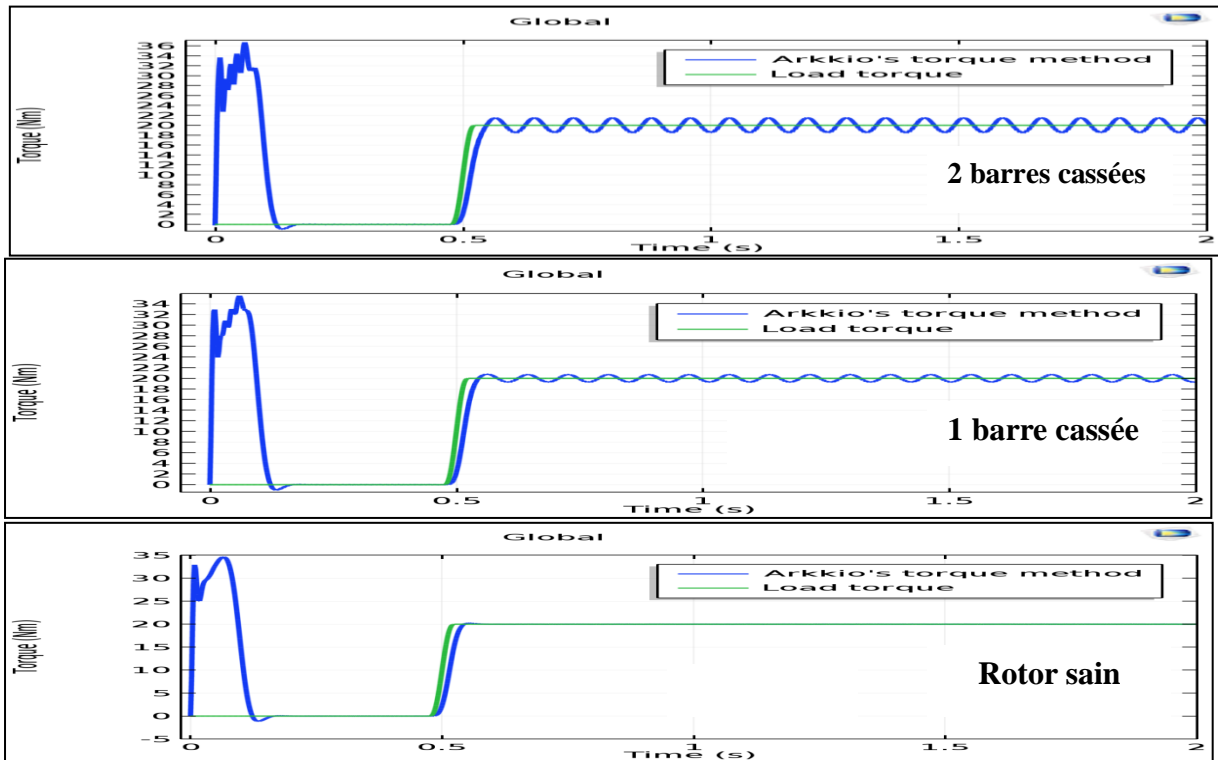


Figure IV.65. Couple utile en pleine charge d'une machine saine, défaillante avec une barre cassée et défaillante avec deux barres cassées.

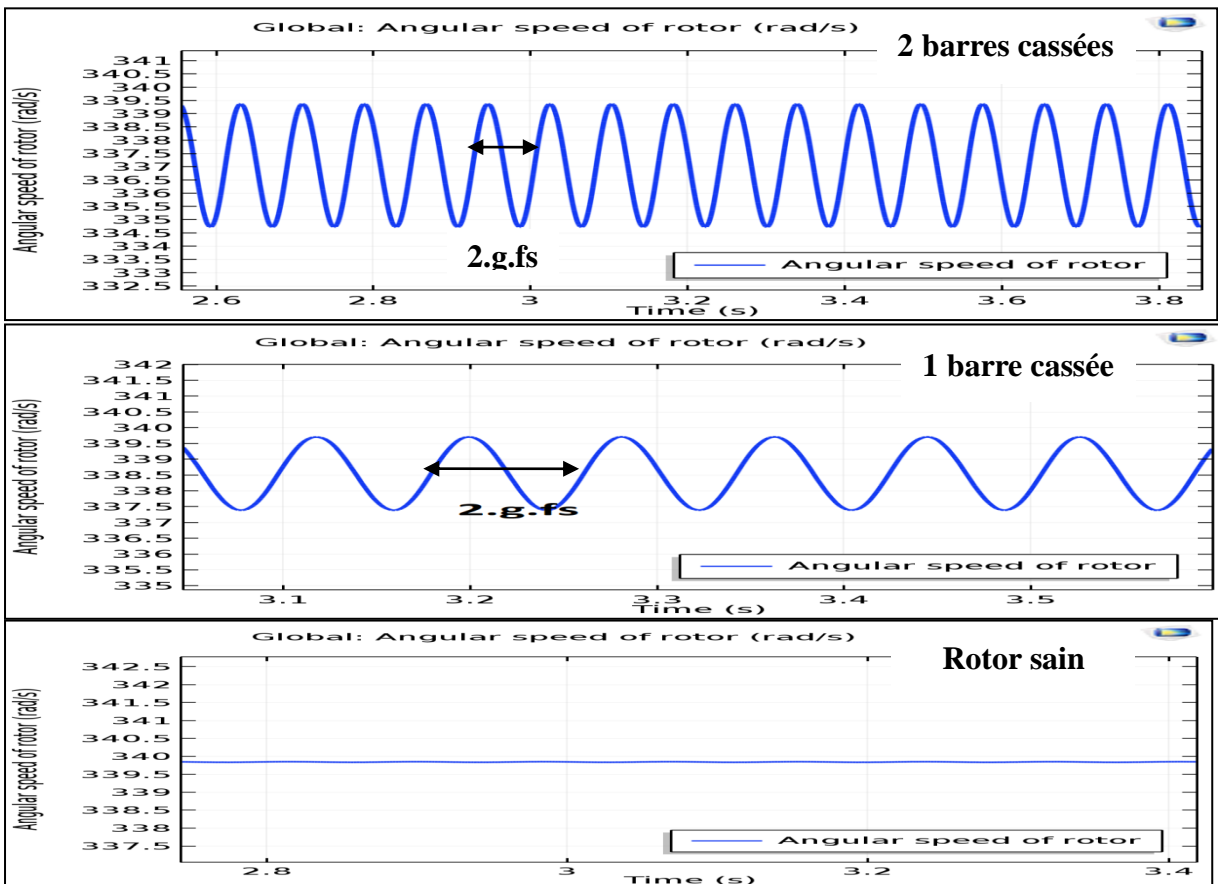


Figure IV.66. La vitesse de rotation en pleine charge d'une machine saine, défaillante avec une barre cassée et défaillante avec deux barres cassées.

IV.5.2. Interprétation

D'après ces deux figures, on peut observer que le défaut de cassure de barre provoque des oscillations dans l'allure de vitesse de rotation, néanmoins ces oscillations deviennent intenses dans le cas de deux barres cassées. Ces oscillations apparaissent à la fréquence de $2.g.fs$. Nous remarquons aussi que les oscillations sont intenses dans l'allure de couple de la machine défaillante avec deux barres cassées par rapport à une barre cassée. Donc on peut dire que les oscillations de la vitesse et du couple sont beaucoup plus influencées par le nombre de barres cassées.

IV.5.3. Etat de 2 cassures de barres par l'étude spectrale

Les figures IV.35 (a-c) représentent respectivement le spectre du couple utile en pleine charge d'une machine saine, défaillante avec une barre cassée et défaillante avec deux barres cassées.

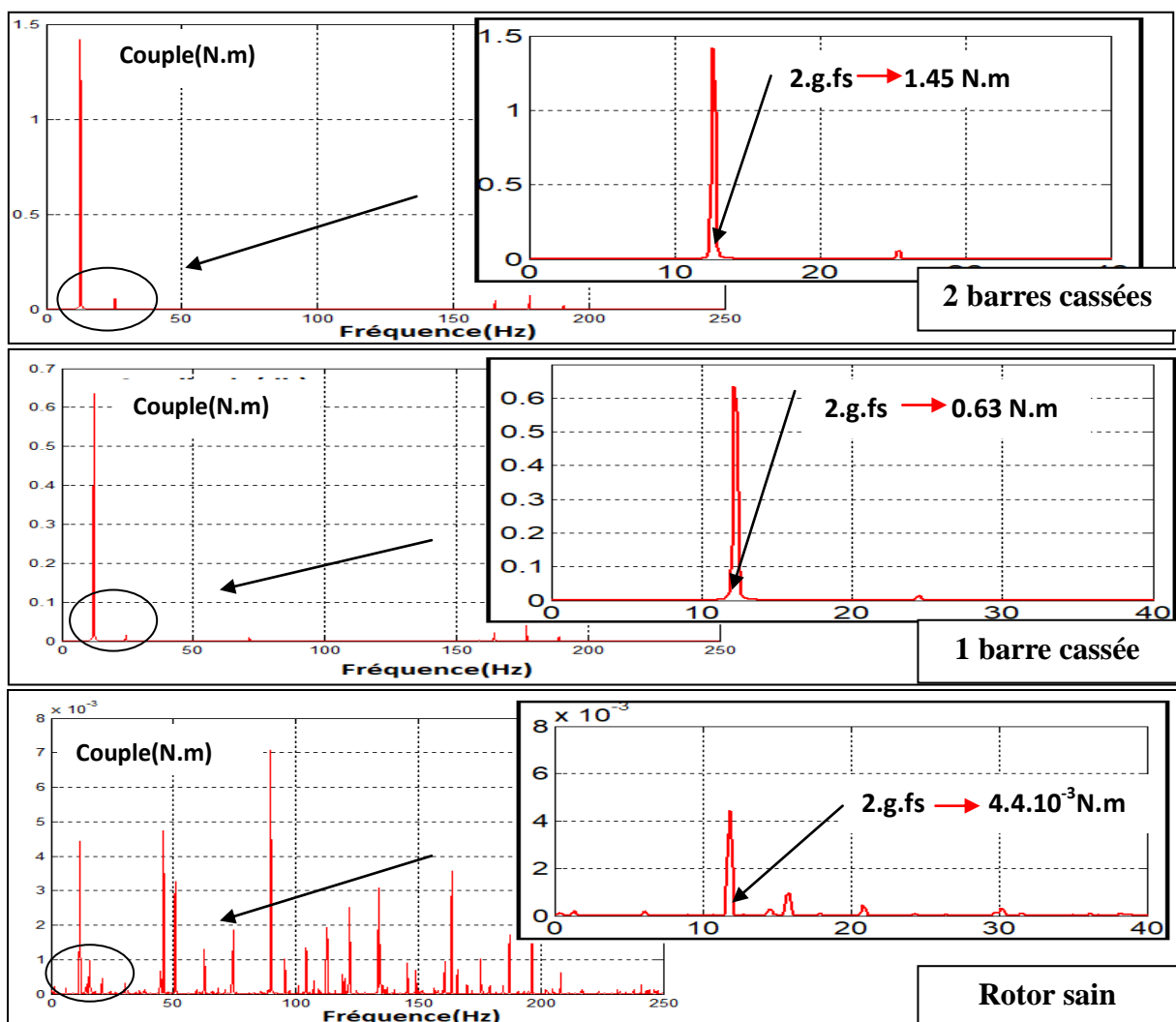


Figure IV.67. (a-c) : Spectre du couple utile en pleine charge d'une machine saine, défaillante avec une barre cassée et défaillante avec deux barres cassées

IV.5.4. Interprétation

Cette figure montre l'apparition des harmoniques dans le spectre du couple utile développé par la machine défaillante avec une barre et deux barres cassées. Ces harmoniques se manifestent à la fréquence $2.g.fs$ et aux multiples de cette valeur. On remarque bien que les amplitudes de ces harmoniques sont proportionnelle au nombre de barres cassées.

IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation de la modélisation des phénomènes magnétodynamique dans une machine asynchrone à l'état sain et avec un défaut de cassure de barre. Ces résultats sont obtenus par le logiciel COMSOL-Multiphysics qui est basé sur la méthode des éléments finis. Notre résultat de simulation permis d'analyser et d'expliquer l'influence des cassures de barres sur les performances du moteur. L'analyse spectrale par la transformée de Fourier rapide est appliquée sur les signaux du couple, de la vitesse, afin de déterminer la composition fréquentielle de ces signaux et par conséquent de trouver les harmoniques caractérisant les cassures de barres.

Conclusion

générale

Conclusion Générale

Dans ce travail nous avons présenté les résultats de la modélisation des phénomènes électromagnétiques et mécanique à l'état sain et avec défauts de la machine asynchrone à cage par le logiciel COMSOL Multiphysics. Dans notre étude, nous avons modélisé une machine qui comporte 36 encoches au stator et 28 barres d'aluminium au rotor pour une seule fréquence d'alimentation 60Hz. Comme une première application étudiée, nous avons modélisé et simulé une machine asynchrone à cage à l'état sain. Pour une deuxième application, on procède par une réduction de la valeur de la conductivité électrique à sa valeur minimale ($\sigma=1$) dans la barre et cela pour obtenir une cassure de barre dans le logiciel COMSOL Multiphysics, en suite, nous avons modélisé la machine avec une seule barre cassée. Finalement pour la troisième application, nous avons modélisé la machine avec deux barres cassées. L'ensemble de notre rapport se situe dans :

- La modélisation des phénomènes magnétodynamique et mécanique dans une machine asynchrone à cage d'écureuil.
- Les différents résultats obtenus par le logiciel COMSOL-Multiphysics qui est basé sur la méthode des éléments finis pour tous les cas de la machine asynchrone étudiée (état sain et avec défauts).
- La comparaison entre les résultats de simulation obtenus par le logiciel COMSOL-Multiphysics d'une part, et d'autre part entre les résultats obtenus par l'analyse spectrale sous l'environnement MATLAB pour les différents cas de la machine étudiée.

Les résultats trouvés sont très satisfaisants et sont conformes avec ceux de la littérature. Nous avons pu observer les ondulations sur les grandeurs couple utile et la vitesse de rotation de la machine ainsi que leur accroissement lors de l'augmentation de la charge et du nombre de barres cassées. Nous avons utilisé le programme de la transformée de Fourier rapide du "Toolbox Matlab", pour exploiter le contenu spectral de couple utile et la vitesse de rotation et de leurs transformés et par conséquent de déterminer la composante 2.g.fs caractérisant le défaut de barres rotoriques. Ensuite, nous avons montré l'influence du nombre de barres cassées sur cette composante.

Nous avons trouvé que l'amplitude de cette composante augmente avec le nombre de barres cassées. Ceci, donne une indication sur la sévérité du défaut.

En perspective, et enfin d'obtenir une vision entière sur le diagnostic des machines asynchrone, il serait intéressant de :

- Envisager une validation expérimentale.
- Étude d'autre type de défaut de la machine asynchrone.

Bibliographie

- [01] : **AIT MIHOUB Mohamed oulhocine** «Méthode globale de diagnostic des machines asynchrones a cage d'écureuil», Université de Mohamed Boudiaf- m'sila, 2006.
- [02] : **M.TARIK MERZOUKI** «Modélisation Couplée Electrique-Magnétique-Mécanique des Machines Asynchrones à Cage en Régime Transitoire par la Méthode des Eléments Finis»
- [03] : **Mr. ABDELKEBIR Adel** «Diagnostic d'un moteur à Induction en utilisant la transformée en ondelettes», Université Mohamed Boudiaf - M'SILA, 20 /05/ 2017
- [04] : **M.Kostenko et L.Piotrovski** «Machines électrique», édition Mir 1977, Tome II, Livre
- [05] : **Claude CHEVASSU et Grégory VALENTIN** «Machines asynchrones, Cours et Problèmes», version du 21 septembre 2014
- [06] : **BENGUEDOUAR Yassine** «Algorithme d'optimisation par essaim de particules (OEP) Application à l'amélioration des moteurs El-Azazga, Algérie», UNIVERSITE DE M'SILA, 2012.
- [07] : **Seyf Eddine HAMDI** «Modélisation d'une machine asynchrone par logiciel COMSOL -Multiphysics» Université de biskra, 24 Juin 2018
- [08] : **BERREZZEK FARID** « Etude des Différentes Techniques de Commande des onduleurs à MLI Associés à une Machine A synchrone » mémoire de magister, Université Badji mokhtar annaba, 2006.
- [09] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_asynchrone#/media/Fichier:Moteur
- [10] : **g.Aubert** «électromagnétisme», dunod université 1971, page 210, Livre
- [11] : **BENDAOU Mohamed Abed Elhalim et HAFIANE Mohamed Tarek** «Modélisation des Phénomènes magnéto-thermique dans les dispositifs de limiteur de courant à base de supraconducteur à haute température critique », Université Kasdi merbah Ouargla, 08/06/2015

- [12] : **CHOUBAR Khoutir et HERREM Zina** «Modélisation des phénomènes électromagnétiques par la méthode des volumes finis dans un dispositif axisymétrique», Université Mohamed Boudiaf - m'sila, 2006
- [13] : **BELKHIRI Yamina** «Modélisation des Phénomènes Electromagnétiques et Mécaniques Couplés par la Méthode des Volumes Finis (CVM)», UNIVERSITE DE BATNA.
- [14] : **Noureddine BEN SEDIRA** «Contribution à l'étude du couplage électromagnétique-thermique dans une charge à symétrie axiale (Étude + Simulation)», Université de Batna, 2013
- [15] : **M. Chaabane** «Analyse numérique, Cours de dea» , Université de Batna, 2001
- [16] : **Bergoug Nassima** «Etude de l'influence des matériaux ferromagnétiques sur les performances d'une machine MHD par la modélisation numérique 2D», Université de Batna, 2006
- [17]: **SUHAS V.patankar** «Numerical heat transfer and fluid», Series in computational methods in mechanics and thermal science, University of Minnesota
- [18]: **H.BECHA** «Modélisation de phénomènes électromagnétique couplé par les volumes finies de la para métrisation dans les systèmes magnétique de chauffage par induction », Thèse de magister, Université de Biskra, 2001
- [19] : **M.Feliachi** «Contribution au calcul du champ électromagnétique par la méthode des éléments finies en vue d'une modélisation dynamique des machine électrique», thèse de docteur ingénieur, Université de paris, janvier 1981
- [20] : **KHBBAB Mohamed** «Etude et modélisation de capteur a courant de Foucault pour le control non destructif (CND) » thèse de magister, Université de Constantine, 2007.
- [21] : **G.Datt et G.touzote** «Présentation de la méthode des éléments finies», Maloine S.A Edition Paris, Deuxième Edition, 1984.
- [22] : <http://cfao30.ulb.ac.be/beams/teaching/meca-h-501/Notes/TP01-introduction-Comsol.pdf>

- [23] : **Nasser FEKIRI** «Transfert de chaleur dans des éléments micro et nano structures», Université de lorraine, 15/07/2013.
- [24] : **H. Razik**, «Contenu spectral du courant absorbé par la machine asynchrone en cas de défaillance, un état de l'art», La revue 3EI, n°29, pp.48-52, juin 2002.
- [25] : **M.Bouzid**, «Diagnostic de défauts de la machine asynchrone par réseaux de neurones», Thèse de Doctorat, Université de El Manar, Ecole nationale d'ingénieurs de Tunis ,2009.
- [26] : **ZERROUK Ahmed** «Diagnostic des défauts de cassure de barres rotoriques dans la machine asynchrone triphasée», Université Mohamed Khider Biskra, 03/06/2013
- [27] : **R. Casimir**, «Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes», Thèse de l'Ecole Centrale de Lyon, CEGELY, 2003.
- [28] : **G. Didier**, «Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances», Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, 2004.
- [29]: **J. A. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, J. R. Folch, M. P. M. Palomares**, «Validation of a New Method for the Diagnosis of Rotor Bar Failures via Wavelet Transform in Industrial Induction Machines», IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 42, No. 4, pp. 990 996, Jul./Aug.2006.
- [30] : **E.S. Hamdi**, «Contribution au Diagnostic d'une Machine Asynchrone Triphasée à Cage», Thèse de doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2006.
- [31] : **Y. Khaled**, «Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone Triphasée par une Approche signal», Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2010