

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 : Machine Electrique

Réf:.....

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

**MASTER**

*Thème*

*Modélisation Des Machines Electriques Par  
Éléments finis*

Présenté par :

**Chellouai Nacereddine Mohammed**

Soutenu le : **05 Juin 2017**

Devant le jury composé de :

Mr. Khene Mohamed Lotfi	<b>MCA</b>	Président
Mr. Aloui Lotfi	<b>Pr.</b>	Encadreur
Mm. Ben Yahia Naima	<b>MCA</b>	Examineur

*Année universitaire: 2016 / 2017*

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 : Machine Electrique

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

**MASTER**

*Thème*

*Modélisation Des Machines Electriques Par  
Éléments finis*

Présenté par :

**Chellouai Nacereddine  
Mohammed**

Avis favorable de l'encadreur :

**Pr. Aloui Lotfi**

Avis favorable du Président du Jury

**Dr. Khene Mohamed Lotfi**

**Cachet et signature**

## *Remerciements.*

*La première des pages qui reste la dernière à écrire... et voilà enfin le moment d'achever ces cinq années passées à l'Université Mohammed Khaider. Et avant tout, je remercie **ALLAH** tout puissant qui m'a donné la force de m'avoir permet d'arriver à ce stade là.*

*Au jour d'aujourd'hui, on se rappelle surtout des bons moments passés avec nos compagnons d'une certaine infortune.*

*A monsieur le professeur **Aloui Lotfi**, pour le soutien qui nous a apporté pendant la période de réalisation de ce modeste travail ainsi pour ses conseils précieux et surtout pour la totale confiance qui nous a accordée.*

*Aux membres du jury, qui ont accepté de participer à la valorisation de ce travail.*

*Et en fin nous tenons vivement à remercier tous nos ami(e)s, chacun à son nom.*

# *Dédicace*

*Pour l'esprit pur de mon Père*

*A mon étoile parmi les étoiles ma Mère*

*A mon frère cher*

*A mes belles sœurs*

*A tout ma Famille et mes cher Amis*

## Résumé :

Ce travail rentre dans le cadre du diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage. La machine asynchrone à cage devient actuellement l'élément clé de la plupart des équipements industriels, du fait de sa robustesse et son faible coût. Malgré ces avantages, un certains nombres de contraintes de natures très différentes peuvent affecter la durée de vie de cette machine, en occasionnant des pertes économiques considérables. Ceci impose la mise en œuvre d'un système de surveillance.

Dans cette logique, nous proposons dans ce travail une étude comparative entre le comportement de la machine saine et le comportement de la machine doté de défaut rotorique.

Une analyse spectrale du courant statorique a été présentée à l'aide de la transformée de Fourier afin de mettre en évidence la présence des harmoniques caractérisant le défaut de cassure de barre et la déséquilibration des tensions d'alimentation.

**Mots clés : machine asynchrone, méthode des éléments finis, diagnostic, analyse spectrale, FFT, U-PSH.**

ملخص:

ينضوي هذا العمل ضمن إطار تشخيص الأخطاء في الماكينات الكهربائية اللامتزامنة ذات القفص السنجابي ثلاثية الأطوار. حالياً، تعتبر الماكينة اللامتزامنة العنصر المفتاح في أغلب التجهيزات الصناعية بفضل صلابتها و ثمنها المنخفض نسبياً. بالرغم من هذه الإيجابيات، قد تتعرض هذه الماكينة إلى أعطال مختلفة تؤثر على أدائها و مدى حياتها الافتراضية، مما يؤدي إلى خسائر اقتصادية معتبرة للمتعامل الصناعي، و هذا ما يفرض وضع نظام مراقبة لتفادي هذه الخسائر.

في خضم هذا العمل اقترحنا مقارنة للماكينة في الحالة العادية و في حالة وجود الأعطال، وهذا من خلال التحليل الطيفي لتيار الجزء المحرض في الماكينة و ذلك بمساعدة تحويل فورييه و الذي يبين وجود الشوائب و التشوهات من عدمه و معرفة ماهية العطل من خلال هذا التحليل. يتبنى هذا التحليل للتيار الكهربائي في الأطوار الثلاثة كوسيلة لاكتشاف الأخطاء من خلال مراقبة مختلف التوترات المتواجدة فيه و المعبرة عن الأخطاء.

الكلمات المفتاحية: الماكينات الكهربائية اللامتزامنة ذات القفص السنجابي ثلاثية الأطوار، التحليل الطيفي، تقنية العناصر المنتهية.

**CHAPITRE I****Etude sur les machines électriques tournent.**

<b>Figure I.1</b>	Principe du générateur d'énergie électrique.	5
<b>Figure I.2.</b>	Principe du moteur électrique.	6
<b>Figure I.3.</b>	Symboles de la machine à courant continu.	8
<b>Figure I.4.</b>	Constitution d'une machine à courant continu.	8
<b>Figure I.5.</b>	Culasse, circuit magnétique statorique d'une machine à courant continu.	9
<b>Figure I.6.</b>	Encoche sur l'induit destinée à recevoir les conducteurs dits actifs.	9
<b>Figure I.7.</b>	Mise en place des conducteurs d'induit dans les encoches et soudure de ceux-ci sur le collecteur.	10
<b>Figure I.8.</b>	système balais-collecteur d'une machine à courant continu.	11
<b>Figure I.9.</b>	Symboles de la machine synchrone.	12
<b>Figure I.10.</b>	Schéma de principe d'un alternateur triphasé sans bagues ni balais.	14
<b>Figure I.11.</b>	Symboles du moteur asynchrone.	15
<b>Figure I.12.</b>	Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.	15
<b>Figure I.13.</b>	Enroulements statoriques d'une phase d'une machine à 4 pôles.	16
<b>Figure I.14.</b>	Rotor à cage d'écureuil d'une machine asynchrone.	17
<b>Figure I.15.</b>	Démarrage étoile-triangle d'une machine asynchrone.	18
<b>Figure I.16.</b>	Caractéristique mécanique lors d'un démarrage étoile-triangle.	18
<b>Figure I.17.</b>	Démarrage par insertion de résistances statoriques.	19
<b>Figure I.18.</b>	Démarrage en trois temps par insertion de résistances rotoriques.	20

**CHAPITRE II****Méthodes de diagnostic et de détection de défauts.**

<b>Figure II.1.</b>	Répartition des défauts pour une machine de moyenne puissance	25
<b>Figure .II.2.</b>	Répartition des défauts pour une machine de grande puissance	26
<b>Figure II.3.</b>	Types d'excentricité	31
<b>Figure II.4.</b>	Défaut d'un rotor à cage d'écureuil	31
<b>Figure II.5.</b>	Les mesures utilisées pour la surveillance et le diagnostic des machines asynchrones.	35
<b>Figure II.6.</b>	Types d'excentricité	39
<b>Figure I.7.</b>	Dimension du roulement à billes.	40

**CHAPITRE III Modélisation de la machine asynchrone triphasée à cage à l'état sain**

<b>Figure III.1.</b>	Fonction d'interpolation d'un élément	49
<b>Figure III.2.</b>	L'enchaînement des programmes de Flux 2D	50
<b>Figure III.3.</b>	Les dimensions de la machine	52
<b>Figure III.4.</b>	Dimensions des fontes	52
<b>Figure III.5.</b>	Bobinage statorique	53
<b>Figure III.6.</b>	Circuit magnétique de la MAS	53
<b>Figure III.7.</b>	Les points de maillage	55
<b>Figure III.8.</b>	Répartition du maillage	55
<b>Figure III.9.</b>	La courbe d'aimantation B (H) du matériau ferromagnétique	56
<b>Figure III.10.</b>	Le circuit électrique d'alimentation	57
<b>Figure III.11.</b>	Circuit équivalent de la cage rotorique	57
<b>Figure III.12.</b>	Les tensions d'alimentation V <sub>U</sub> , V <sub>V</sub> et V <sub>W</sub>	58
<b>Figure.III.13.</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.005 (s).	59
<b>Figure.III.14</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.8 (s)	59
<b>Figure.III.15.</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 3 (s)	60
<b>Figure.III.16.</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 7 (s)	60
<b>Figure.III.17.</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.005(s)	60
<b>Figure.III.18.</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.8(s)	61
<b>Figure.III.19.</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 3(s)	61
<b>Figure.III.20.</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 7(s)	61
<b>Figure.III.21.</b>	Forme d'onde du courant statorique:(a) phase V <sub>U</sub> , (b) phase V <sub>V</sub> , (c) V <sub>W</sub>	62
<b>Figure.III.22.</b>	Spectre (avec zoom) du courant statorique phase V <sub>U</sub> .	62
<b>Figure.III.23.</b>	Vitesse de rotation de la machine a l'état sain.	63
<b>Figure.III.24.</b>	Couple électromagnétique de la machine saine en pleine charge.	63
<b>Figure.III.25.</b>	Spectre du Couple électromagnétique (avec zoom) de la machine saine en pleine charge.	63
<b>Figure.III.26.</b>	Le courant des barres a l'état saine,(a) la barre (5),(b)la barre(10),(c) la barre(20)	64
<b>Figure.III.27.</b>	Spectre du courant de la barre (05) pour la machine asynchrone en pleine charge (avec zoom).	64
<b>Figure.III.28.</b>	Spectre du courant de la barre (10) pour la machine asynchrone en pleine charge (avec zoom).	65
<b>Figure.III.29.</b>	Spectre du courant de la barre (20) pour la machine asynchrone en pleine charge (avec zoom).	65

## CHAPITRE IV Modélisation de la machine asynchrone triphasée à cage avec défauts

<b>Figure. IV.1.</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.005 (s).	67
<b>Figure. IV.2.</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.8 (s)	68
<b>Figure. IV.3.</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 3 (s).	68
<b>Figure. IV.4.</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 7 (s).	68
<b>Figure. IV.5.</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.005(s)	69
<b>Figure. IV.6.</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.8(s)	69
<b>Figure. IV.7.</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 3(s)	69
<b>Figure. IV.8.</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 7(s)	70
<b>Figure. IV.9.</b>	Forme d'onde du courant statorique phase V_U	70
<b>Figure. IV.10.</b>	Spectre (avec zoom) du courant statorique phase V_U.	70
<b>Figure. IV.11.</b>	Vitesse de rotation de la machine.	71
<b>Figure. IV.12.</b>	Couple électromagnétique de la machine.	71
<b>Figure. IV.13.</b>	Spectre du Couple électromagnétique (avec zoom) de la machine.	71
<b>Figure. IV.14.</b>	Le courant d'une barre cassée (5).	72
<b>Figure. IV.15.</b>	Spectre (avec zoom) du courant d'une barre cassée(5).	72
<b>Figure. IV.16.</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.005 (s).	73
<b>Figure. IV.17.</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.005 (s).	73
<b>Figure. IV.18.</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.005 (s).	73
<b>Figure. IV.19.</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.005(s)	74
<b>Figure. IV.20.</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.8(s)	74
<b>Figure. IV.21.</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 3 (s)	74
<b>Figure. IV.22.</b>	Forme d'onde du courant statorique de la phase (avec zoom).	75
<b>Figure. IV.23.</b>	Spectre (avec zoom) du courant statorique phase.	75
<b>Figure. IV.24.</b>	Vitesse de rotation de la machine.	75
<b>Figure. IV.25.</b>	Couple électromagnétique de la machine.	75
<b>Figure. IV.26.</b>	Spectre du Couple électromagnétique (avec zoom) de la machine.	76
<b>Figure. IV.27.</b>	Le courant d'une barre cassée (5).	76
<b>Figure. IV.28.</b>	Spectre (avec zoom) du courant d'une barre cassée(5).	76
<b>Figure. IV.29.</b>	Le courant d'une barre cassée (10).	77
<b>Figure. IV.30.</b>	Spectre (avec zoom) du courant d'une barre cassée (10).	77
<b>Figure. IV.31.</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.005 (s).	78
<b>Figure. IV.32.</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.8 (s).	78
<b>Figure. IV.33.</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 3 (s).	78
<b>Figure. IV.34.</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.005(s)	79
<b>Figure. IV.35.</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.8(s)	79

<b>Figure. IV.36.</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 7(s)	79
<b>Figure. IV.37.</b>	Forme d'onde du courant statorique de la phase.	80
<b>Figure. IV.38.</b>	Spectre (avec zoom) du courant statorique phase.	80
<b>Figure. IV.39.</b>	Vitesse de rotation de la machine.	80
<b>Figure. IV.40.</b>	Couple électromagnétique de la machine.	81
<b>Figure. IV.41.</b>	Spectre du couple électromagnétique (avec zoom) de la machine.	81
<b>Figure. IV.42.</b>	Le courant d'une barre cassée (5).	81
<b>Figure. IV.43.</b>	Spectre (avec zoom) du courant d'une barre cassée(5).	82
<b>Figure. IV.44.</b>	Le courant d'une barre cassée (10).	82
<b>Figure. IV.45.</b>	Spectre (avec zoom) du courant d'une barre (10) cassée.	82
<b>Figure. IV.46.</b>	Le courant d'une barre cassée (20).	83
<b>Figure. IV.47.</b>	Spectre (avec zoom) du courant d'une barre (20) cassée.	83
<b>Figure. IV.48.</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.005 (s).	84
<b>Figure. IV.49.</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 8 (s).	84
<b>Figure. IV.50.</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 3 (s).	84
<b>Figure. IV.51.</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.005(s)	85
<b>Figure. IV.52.</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.8(s)	85
<b>Figure. IV.53.</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 3(s)	85
<b>Figure. IV.54.</b>	Forme d'onde de la tension (tension $V_U$ déséquilibrée)	86
<b>Figure. IV.55.</b>	Forme d'onde du courant statorique (phase $V_U$ déséquilibrée)	86
<b>Figure. IV.56.</b>	Forme d'onde du courant statorique de la phase (phase $V_U$ déséquilibrée)	86
<b>Figure. IV.57.</b>	Spectre (avec zoom) du courant statorique phase.	87
<b>Figure. IV.58.</b>	Couple électromagnétique de la machine.	87
<b>Figure. IV.59.</b>	Spectre du Couple électromagnétique (avec zoom) de la machine.	87
<b>Figure. IV.60.</b>	Vitesse de rotation de la machine.	88
<b>Figure. IV.62.</b>	Le courant d'une barre saine (5).	88
<b>Figure. IV.63.</b>	Spectre (avec zoom) du courant d'une barre saine (5).	88
<b>Figure. IV.64.</b>	Le courant d'une barre saine (10).	89
<b>Figure. IV.65.</b>	Spectre (avec zoom) du courant d'une barre saine (10).	89
<b>Figure. IV.66.</b>	Le courant d'une barre saine (20).	89
<b>Figure. IV.67.</b>	Spectre (avec zoom) du courant d'une barre cassée (20).	90
<b>Figure. IV.68.</b>	Les courants des barres saines (5, 10,20).	90
<b>Figure. IV.69.</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.005 (s).	90
<b>Figure. IV.70.</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.8 (s).	91
<b>Figure. IV.71.</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 3 (s).	91
<b>Figure. IV.72.</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.005(s)	91

<b>Figure. IV.73.</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.8(s)	92
<b>Figure. IV.74.</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 3 (s)	92
<b>Figure. IV.75.</b>	Forme d'onde de la tension phase V_U, phase V_V, V_W	92
<b>Figure. IV.76.</b>	Forme d'onde des courants des phases V_U, phase V_V, V_W	93
<b>Figure. IV.77.</b>	Forme d'onde du courant statorique	93
<b>Figure. IV.78.</b>	Spectre (avec zoom) du courant statorique phase V_U.	94
<b>Figure. IV.79.</b>	Spectre (avec zoom) du courant statorique phase V_V et phase V_W.	94
<b>Figure. IV.80.</b>	Vitesse de rotation de la machine.	94
<b>Figure. IV.81.</b>	Couple électromagnétique de la machine.	95
<b>Figure. IV.82.</b>	Spectre du Couple électromagnétique (avec zoom) de la machine.	95
<b>Figure. IV.83.</b>	Le courant d'une barre saine (5).	95
<b>Figure. IV.84.</b>	Spectre (avec zoom) du courant d'une barre saine (5).	96
<b>Figure. IV.85.</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.005 (s).	96
<b>Figure. IV.86.</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.8 (s).	96
<b>Figure. IV.87.</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 3 (s).	97
<b>Figure. IV.88.</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.005(s)	97
<b>Figure. IV.89.</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.8(s)	97
<b>Figure. IV.90.</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 3(s)	98
<b>Figure. IV.91.</b>	Forme d'onde de la tension phase V_U, phase V_V, V_W	98
<b>Figure. IV.92.</b>	Forme d'onde du courant statorique phase V_U, phase V_V, phase V_W	98
<b>Figure. IV.93.</b>	Spectre (avec zoom) du courant statorique phase V_U.	99
<b>Figure. IV. 94</b>	Couple électromagnétique de la machine.	99
<b>Figure. IV.95.</b>	Spectre du Couple électromagnétique (avec zoom) de la machine.	99
<b>Figure. IV.96.</b>	Vitesse de rotation de la machine.	100
<b>Figure. IV.97.</b>	Le courant d'une barre (5).	100
<b>Figure. IV.98.</b>	Spectre (avec zoom) du courant d'une barre (5).	100
<b>Figure. IV.99.</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.005 (s).	101
<b>Figure.IV.100</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.8 (s).	101
<b>Figure.IV.101</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 3 (s).	101
<b>Figure.IV.102</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.005(s)	102
<b>Figure.IV.103</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.8(s)	102
<b>Figure.IV.104</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 3 (s)	102
<b>Figure.IV.105</b>	Forme d'onde de la tension phase (V_U déséquilibrée), phase V_V, V_W	103
<b>Figure.IV.106</b>	Forme d'onde du courant statorique (phase V_U déséquilibrée)	103
<b>Figure.IV.107</b>	Forme d'onde du courant statorique (phase V_U déséquilibrée)	103
<b>Figure.IV.108</b>	Spectre (avec zoom) du courant statorique d'une phase.	104

<b>Figure.IV.109</b>	Couple électromagnétique de la machine.	104
<b>Figure.IV.110</b>	Spectre du Couple électromagnétique (avec zoom) de la machine.	104
<b>Figure.IV.111</b>	Vitesse de rotation de la machine.	105
<b>Figure.IV.112</b>	Le courant des barres casse avec une phase V_U déséquilibrée	105
<b>Figure.IV.113</b>	Spectre (avec zoom) du courant d'une barre cassée(5).	105
<b>Figure.IV.114</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.005 (s).	106
<b>Figure.IV.115</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.8 (s).	106
<b>Figure.IV.116</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 3 (s).	106
<b>Figure.IV.117</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.005(s)	107
<b>Figure.IV.118</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.8(s)	107
<b>Figure.IV.119</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 3(s)	107
<b>Figure.IV.120</b>	Forme d'onde de la tension phase (V_U et V_V déséquilibrée), V_W équilibrée	108
<b>Figure.IV.121</b>	Forme d'onde du courant statorique phase (V_U et V_V déséquilibrée) phase V_W équilibrée	108
<b>Figure.IV.122</b>	Forme d'onde du courant statorique	109
<b>Figure.IV.123</b>	Spectre (avec zoom) du courant statorique phase V_U.	109
<b>Figure.IV.124</b>	Spectre du courant statorique phase V_V et phase V_W.	109
<b>Figure.IV.125</b>	Vitesse de rotation de la machine.	110
<b>Figure.IV.126</b>	Couple électromagnétique de la machine.	110
<b>Figure.IV.127</b>	Spectre du Couple électromagnétique (avec zoom) de la machine.	110
<b>Figure.IV.128</b>	Le courant de barre casse(5) avec deux phases V_U et V_V déséquilibrée.	111
<b>Figure.IV.129</b>	Spectre (avec zoom) du courant d'une barre cassée(5).	111
<b>Figure.IV.130</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.005 (s).	111
<b>Figure.IV.131</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.8 (s).	112
<b>Figure.IV.132</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 3 (s).	112
<b>Figure.IV.133</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.005(s)	112
<b>Figure.IV.134</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.8(s)	113
<b>Figure.IV.135</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 3(s)	113
<b>Figure.IV.136</b>	Forme d'onde de la tension phase (V_U et V_V, V_W déséquilibrée)	113
<b>Figure.IV.137</b>	Forme d'onde du courant statorique phase (V_U et V_V, V_W déséquilibrée)	114
<b>Figure.IV.138</b>	Spectre (avec zoom) du courant statorique phase V_U.	114
<b>Figure.IV.139</b>	Couple électromagnétique de la machine.	114
<b>Figure.IV.140</b>	Spectre du Couple électromagnétique (avec zoom) de la machine.	115
<b>Figure.IV.141</b>	Vitesse de rotation de la machine.	115
<b>Figure.IV.142</b>	Le courant des barres casse (5) à l'état des trois phases déséquilibrées.	115
<b>Figure.IV.143</b>	Spectre (avec zoom) du courant d'une barre cassée(5).	116

<b>Figure.IV.144</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.005 (s).	116
<b>Figure.IV.145</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.8 (s).	116
<b>Figure.IV.146</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 3(s).	117
<b>Figure.IV.147</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.005(s)	117
<b>Figure.IV.148</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.8(s)	117
<b>Figure.IV.149</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 3(s)	118
<b>Figure.IV.150</b>	Forme d'onde de la tension phase (V_U déséquilibrée)	118
<b>Figure.IV.151</b>	Forme d'onde du courant statorique phase (V_U déséquilibrée)	118
<b>Figure.IV.152</b>	Forme d'onde du courant statorique phase (V_U déséquilibrée).	119
<b>Figure.IV.153</b>	Spectre (avec zoom) du courant statorique phase V_U.	119
<b>Figure.IV.154</b>	Couple électromagnétique de la machine.	119
<b>Figure.IV.155</b>	Spectre du Couple électromagnétique (avec zoom) de la machine.	120
<b>Figure.IV.156</b>	Vitesse de rotation de la machine.	120
<b>Figure.IV.157</b>	Le courant des barres casse (5) à l'état d'une phase (V_U) déséquilibrée.	120
<b>Figure.IV.158</b>	Spectre (avec zoom) du courant d'une barre cassée(5).	121
<b>Figure.IV.159</b>	Le courant des barres casse (10) à l'état d'une phase (V_U) déséquilibrée.	121
<b>Figure.IV.160</b>	Spectre (avec zoom) du courant d'une barre cassée(10).	121
<b>Figure.IV.161</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.005 (s).	122
<b>Figure.IV.162</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.8 (s).	122
<b>Figure.IV.163</b>	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 3 (s).	122
<b>Figure.IV.164</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.005(s)	123
<b>Figure.IV.165</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.8(s)	123
<b>Figure.IV.166</b>	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 3 (s)	123
<b>Figure.IV.167</b>	Forme d'onde de la tension phase (V_U et V_V déséquilibrée) V_W équilibrée	124
<b>Figure.IV.168</b>	Forme d'onde du courant statorique phase (V_U et V_V, déséquilibrée)	124
<b>Figure.IV.169</b>	Forme d'onde du courant statorique	125
<b>Figure.IV.170</b>	Spectre (avec zoom) du courant statorique phase V_U.	125
<b>Figure.IV.171</b>	Spectre du courant statorique phase V_V et phase V_W.	125
<b>Figure.IV.172</b>	Couple électromagnétique de la machine.	126
<b>Figure.IV.173</b>	Spectre du Couple électromagnétique (avec zoom) de la machine.	126
<b>Figure.IV.174</b>	Vitesse de rotation de la machine.	126
<b>Figure.IV.175</b>	Le courant des barres casse (5) a l'état de la phase (V_U, V_V) déséquilibrée.	127
<b>Figure.IV.176</b>	Spectre (avec zoom) du courant d'une barre cassée(5).	127
<b>Figure.IV.177</b>	Le courant des barres casse (10) à l'état de la phase (V_U, V_V) déséquilibrée.	127

### **CHAPITRE I**

#### **Etude sur les machines électriques tournent.**

**Tableau I.1** Comparaison entre les différents types des machines électriques. 22

### **CHAPITRE II**

#### **Méthodes de diagnostic et de détection de défauts**

**Tableau II.1.** Défauts des machines électriques selon leurs origines 33

### **CHAPITRE III**

#### **Modélisation de la machine asynchrone triphasée à cage à l'état sain**

**Tableau III.1.** Les paramètres et son valeurs la machine asynchrone étudiée. 51

### Liste des symboles.

$l$	: La longueur du conducteur
$V$	: La vitesse du conducteur
$B$	: Induction magnétique
$F_m$	: La force mécanique
$E_0$	: Générateur de f.é.m.
$R$	: Résistance interne
$I$	: Le courant
$F_e$	: Force électromagnétique
$E$	: Force électromotrices (f.é.m.)
$\Omega$	: Domaine surfacique.
$A$	: Potentiel magnétique.
$\Gamma$	: Frontière de domaine $\Omega$ .
$\mu_0$	: Perméabilité magnétique de l'air.
$\mu_r$	: La perméabilité relative du fer
$\varepsilon$	: Permittivité électrique.
$\mu$	: Perméabilité magnétique.
$J$	: Densité de courant uniforme.
$\rho$	: Charges électriques.
$\sigma$	: conductivité électrique.
$j$	: unité imaginaire.
$t$	: Temps.
$L_1, L_2, L_3$	: Inductances de fuite des têtes des bobines statorique.
$g$	: Glissement.
$\omega_s$	: Pulsation statorique.
$p$	: Nombre de paires de pôles.
$N_b$	: Nombre de barres rotoriques.
$n_{\omega s}$	: Ordre des harmoniques de temps de la FMM.
$n_d$	: Ordre de l'excentricité.
$f_s$	: Fréquence d'alimentation.
$f_r$	: Fréquence rotorique.
$f_{he}$	: Fréquence des harmoniques d'encoches rotoriques.
$f_{roul}$	: Fréquence de vibration relative aux défauts de roulements.

$f_v$	: Fréquence caractéristique de vibration.
$f_{bille}$	: Fréquence de vibration relative aux défauts de billes.
$f_{b.int}$	: Fréquence de vibration relative au défaut de bague intérieure.
$f_{b.ext}$	: Fréquence de vibration relative au défaut de bague extérieur.
$f_b$	: Fréquence caractéristique du défaut de barres.
$f_{ecc}$	: Fréquence d'ordre supérieur caractéristique du défaut d'excentricité.
$f_{mix}$	: Fréquence caractéristique du défaut d'excentricité mixte.
$f_{st}$	: Fréquence caractéristique du défaut statorique.
$n_b$	: Nombre d'éléments roulant du roulement.
$\theta$	: L'angle de contact des bielles avec les bagues du roulement.
$Db$	: Le diamètre d'un élément roulant.
$Dc$	: La distance entre les centres des billes diamétralement opposées.
$I_U, I_V, I_W$	: Les courants des phases du modèle de la machine étudiée.
$V_U, V_V, V_W$	: Les tensions des phases du modèle de la machine étudiée.

---

**Sommaire**

Liste des symboles utilisés.....	iv
Liste des tableaux.....	vi
Liste des figures.....	vii
Introduction générale .....	1

**Chapitre I : Etude sur les machines électriques tournante.**

I.1 Introduction.....	3
I.2 Les machines électriques.....	3
I.2.1 Définition de la machines électriques.....	3
I.2.2 Historique.....	3
I.2.3 Lois générales de la conversion électromécanique.....	5
I.3 Types de la machines électriques.....	7
I.3.1 Machines à courant continu.....	7
I.3.1.1 Symboles.....	7
I.3.1.2 Constitution d'une machine à courant continu.....	8
I.3.1.3 Modes d'excitation des machines à courant continu.....	11
I.3.2 Machines synchrones.....	11
I.3.2.1 Symboles.....	11
I.3.2.2 Constitution d'une machine synchrone.....	12
I.3.2.3 Excitation de la machine synchrone.....	13
I.3.3 Machines asynchrones.....	14
I.3.3.1 Symboles.....	14
I.3.3.2 Constitution d'une machine asynchrone.....	15
I.3.3.3 Démarrage du moteur asynchrone.....	17
I.4 Comparatif des machines électriques.....	20
I.5 Conclusion.....	22

**Chapitre II : Méthodes de diagnostic et de détection de défauts.**

II.1 Introduction.....	23
II.2 Définition de quelques termes liés au diagnostic.....	23
II.3 Les défauts de la machine asynchrone.....	25
II.3.1 L'étude statistique des défauts.....	25
II.3.2 Défauts statoriques.....	27
II.3.2.1 Défauts d'isolant dans un enroulement.....	28

II.3.2.2 Un court-circuit entre spires de la même phase.....	28
II.3.2.3 Un court-circuit entre phases.....	29
II.3.2.4 Défauts du circuit magnétique.....	29
II.3.3 Défauts rotoriques .....	29
II.3.3.1 Défauts de roulements.....	29
II.3.3.2 Excentricité.....	30
II.3.3.3 Défauts de rupture de barres et d’anneau de court-circuit.....	31
II.4 Causes des défauts.....	32
II.5 Méthodes de diagnostic des machines asynchrones.....	33
II.5.1 L’estimation de paramètres physiques.....	33
II.5.2 L’estimation d’état.....	33
II.5.3 Traitement de signaux.....	34
II.6 Paramètres indicateurs de défaut.....	35
II.6.1 Le flux magnétique axial de fuite.....	35
II.6.2 Le courant statorique.....	35
II.6.3 Les vibrations.....	36
II.6.4 Le couple.....	36
II.6.5 La température.....	37
II.7 Signatures spectrales pour révéler le défaut .....	37
II.7.1 Les harmoniques de la fmm dans la machine asynchrone.....	37
II.7.2 Les défauts statoriques.....	38
II.7.3 Défaut de court-circuit.....	38
II.7.4 Les défauts des barres rotoriques.....	38
II.7.5 Les défauts d’excentricité.....	39
II.7.6 Les défauts de roulements.....	40
II.8 Conclusion .....	41
<b>Chapitre III : Modélisation de la machine asynchrone triphasée à cage à l’état sain</b>	
III.1 Introduction.....	42
III.2. Méthodes de modélisation de la machine asynchrone .....	42
III.2.1. Méthode des réseaux de perméance.....	43
III.2.2 Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés.....	44
III.2.3 Méthode des éléments finis .....	44
III.3 Modèle éléments finis de la machine asynchrone.....	44
III.3.1 Formulations.....	44

---

III.3.2 Le modèle employé.....	46
III.3.3 Le principe de la MEF.....	48
III.4 Présentation du logiciel FLUX2D.....	49
III.5 Construction du modèle de la machine asynchrone.....	50
III.5.1 Les données de la machine étudiée.....	51
III.5.2 Procédure de construction du modèle par FLUX2D.....	54
III.5.3 Génération du maillage.....	54
III.5.4 Création des matériaux.....	56
III.5.5 Le circuit électrique.....	56
III.5.6 Les propriétés physiques et régions.....	58
III.6 Simulation de la machine asynchrone triphasée à cage à l'état sain.....	59
III.7 Conclusion.....	65
 <b>Chapitre IV : Modélisation de la machine asynchrone triphasée à cage avec défauts</b> 	
IV.1. Introduction.....	66
IV.2 Modélisation de la machine AS à cage avec défaut de cassure de barres.....	66
IV.2.1 Cas de cassure d'une seule barre.....	67
IV.2.1.1 Résultats de la simulation de cassure d'une seule barre.....	67
IV.2.2 Cas de cassure des deux barres.....	72
IV.2.2.1 Résultats de la simulation de cassure des deux barres.....	72
IV.2.3 Cas de cassure des trois barres.....	77
IV.2.3.1 Résultats de la simulation de cassure des deux barres.....	77
IV.3 Modélisation de la machine AS à cage avec défaut de déséquilibre d'alimentation.....	83
IV.3.1 Cas d'une seule phase déséquilibré.....	83
IV.3.2 Cas des deux phases déséquilibrées.....	90
IV.3.3 Cas des trois phases déséquilibrées.....	96
IV.4 Modélisation de la machine AS à cage avec défaut de déséquilibre d'alimentation et défaut de cassure de barres.....	101
IV.4.1 Cas de cassure d'une seule barre avec une tension déséquilibrée.....	101
IV.4.2 Cas de cassure d'une seule barre avec deux tensions déséquilibrées.....	106
IV.4.3 Cas de cassure d'une seule barre avec trois tensions déséquilibrées.....	111
IV.4.4 Cas de cassure de deux barres avec une tension déséquilibrée.....	116
IV.4.5 Cas de cassure de deux barres avec deux tensions déséquilibrées.....	122
IV.5. Conclusion.....	128

## *Introduction générale*

La machine est une réalité technique qui joue un rôle dans la production, mais c'est aussi une réalité humaine et sociale qui a des effets profonds sur la vie matérielle des hommes, sur l'organisation du travail et les rapports sociaux. Ce dernier aspect alimente depuis Aristote la réflexion des philosophes dont l'attitude vis-à-vis de la machine s'est modifiée en même temps qu'évoluaient les techniques elles-mêmes. La machine a enfin été un modèle épistémologique pour penser le fonctionnement de l'organisme.

Les défauts qui apparaissent dans la machine électrique ont des causes variées. Ils peuvent être dus au vieillissement des constituants du moteur ou bien aux conditions d'utilisation ou tout simplement à un défaut de fabrication dont l'effet serait imperceptible lors de la mise en service. Tout ces défauts (usure des paliers, engrenages, rupture de barre, court-circuit statorique, etc...) ont été abondamment traités dans la littérature et sont aujourd'hui bien connus. Malheureusement, les contraintes nouvelles et l'intégration de ces machines dans des systèmes de conversion d'énergie de plus en plus complexes rendent le diagnostic plus difficile. Par exemple, l'interface de puissance de la chaîne d'asservissement (l'onduleur) et les conditions d'utilisations souvent très sévères (vibration, humidité, couple transitoire important) mettent les bobinages à rude épreuve. Les courts circuits statoriques sont ainsi une des principales causes de défaillance des entraînements électriques. A partir de là apparaît le diagnostic de l'isolation électrique des machines qui devient un enjeu industriel majeur en effet, les contraintes très fortes en disponibilité de certaines machines (alternateurs de centrales électriques par exemple) nécessitent la mise en œuvre de stratégies de maintenance préventives et/ou correctives.

La considération du comportement électromagnétique local du moteur permet d'avoir une modélisation plus précise. La résolution numérique des équations de Maxwell régissant le comportement des champs électromagnétiques et la prise en considération des équations électriques représentant le circuit d'alimentation du moteur, permet de réduire les simplifications faites dans les modèles classiques et ainsi d'avoir un modèle plus proche de la machine électrique réelle, dans ce but nous orientons dans cette mémoire d'utiliser la méthode de calcul par éléments finis à travers de l'outil logiciel FLUX 2d, ce dernier qui nous permet d'utiliser la technique de circuits couplés c'est-à-dire le couplage entre le circuit magnétique et le circuit électrique.

Dans le premier chapitre, nous présenterons la définition de la machine électrique. Après cela, nous allons citer les différents types des machines électriques. Puis, nous donnerons une comparaison entre les différents types des machines électriques.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les principaux défauts pouvant modifier le bon fonctionnement de la machine asynchrone, leurs origines, ainsi que leurs signatures spectrales sur le courant statoriques. Nous présenterons par la suite, les différentes techniques utilisées pour

la détection des défauts, ainsi que les approches utilisées pour la modélisation de la machine asynchrone.

Le troisième chapitre, est consacré à la présentation du modèle éléments finis de la machine asynchrone triphasée à cage, après ça nous montrerons les résultats de la simulation du machine asynchrone, dans les différentes conditions de fonctionnement, et, nous présenterons l'analyse spectral du courant statorique (à l'aide de la transformée de Fourier ),a l'état saine, et l'influence de quelle que paramètre comme (le couple et la tension de calcul) sur l'analyse spectrale du courant statorique.

Dans le quatrième chapitre, nous présenterons l'analyse spectrale du courant statorique afin de mettre en évidence la présence des harmoniques caractérisant le défaut dans le rotor (cassure des barres et le déséquilibre de tension d'alimentation).

Une conclusion générale s'impose à la fin de ce mémoire, pour montrer l'état d'avancement de notre travail.

## **I.1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous présenterons la définition de la machine électrique. Après cela, nous allons citer les différents types des machines électriques. Puis, nous donnerons une comparaison entre les différents types des machines électriques.

## **I.2 Les machines électriques**

### **I.2.1 Définition de la machines électriques**

Une machine électrique est un dispositif électromécanique basé sur l'électromagnétisme permettant la conversion d'énergie électrique par exemple en travail ou énergie mécanique. Ce processus est réversible et peut servir à produire de l'électricité :

Les machines électriques produisant de l'énergie électrique à partir d'une énergie mécanique sont communément appelées des génératrices, dynamos ou alternateurs suivant la technologie utilisée. [WIKI, 01]

Les machines électriques produisant une énergie mécanique à partir d'une énergie électrique sont communément appelées des moteurs.

Cependant, toutes ces machines électriques étant réversibles et susceptibles de se comporter soit en « moteur » soit en « générateur » dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse la distinction moteur/générateur se fait « communément » par rapport à l'usage final de la machine.

Les moteurs rotatifs produisent une énergie correspondant au produit d'un couple par un déplacement angulaire (rotation) tandis que les moteurs linéaires produisent une énergie correspondant au produit d'une force par un déplacement linéaire.

En dehors des machines électriques fonctionnant grâce à l'électromagnétisme il existe aussi des machines électrostatiques et d'autres utilisant l'effet piézoélectrique.

Les transformateurs sont aussi classifiés comme des machines électriques. Ils permettent de modifier les valeurs de tension et d'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative, en un système de tension et de courant de valeurs différentes, mais de même fréquence et de même forme. [WIKI, 01]

### **I.2.2 Historique**

En 1821, après la découverte du phénomène du lien entre électricité et magnétisme, l'électromagnétisme, par le chimiste Danois Oersted, le physicien anglais Michael Faraday construit deux appareils pour produire ce qu'il appela une « rotation électromagnétique » : le

mouvement circulaire continu d'une force magnétique autour d'un fil, en fait la démonstration du premier moteur électrique.

En 1822, Peter Barlow construit ce qui peut être considéré comme le premier moteur électrique de l'histoire : la « roue de Barlow » qui est un simple disque métallique découpé en étoile et dont les extrémités plongent dans un godet contenant du mercure qui assure le passage du courant. Elle ne produit cependant qu'une force juste capable de la faire tourner, ne lui permettant pas d'application pratique.

Le premier commutateur utilisable expérimentalement a été inventé en 1832 par William Sturgeon. Le premier moteur à courant continu fabriqué avec l'intention d'être commercialisé a été inventé par Thomas Davenport en 1834 puis breveté en 1837. Ces moteurs n'ont pas connu de développement industriel à cause du coût des batteries à l'époque.

On doit la vérification pratique de la réversibilité des machines électriques au physicien italien Antonio Pacinotti en 1864.

En 1869, l'inventeur belge Zénobe Gramme rend possible la réalisation des génératrices à courant continu en imaginant le collecteur. Il améliore les premières versions archaïques d'alternateurs (1867) et devient célèbre en retrouvant le principe de l'induit en anneau de Pacinotti. En 1871, il présentera à l'Académie des sciences de Paris la première génératrice industrielle de courant continu, que l'on appela machine de Gramme.

En 1873, Hippolyte Fontaine, partenaire de Zénobe Gramme réalise la première application industrielle de la transmission électrique des forces. Tout en démontrant à l'occasion de l'exposition de Vienne, la réversibilité de la machine de Gramme, il présente une expérience associant dynamo et moteur à courant continu, séparés par 2 km de fils électriques. Avant cette expérience décisive, l'énergie mécanique des cours d'eau devait être utilisée sur place, car intransportable sur de longues distances.

Le physicien Nikola Tesla dépose un brevet de « machine électrique-dynamo » en 1886 (publié en 1887).

La paternité de la machine asynchrone est controversée entre trois inventeurs : en 1887, le physicien Nikola Tesla dépose un brevet sur la machine asynchrone (publié en 1888) puis en mai de l'année suivante cinq autres brevets. Pendant la même période Galileo Ferraris publie des traités sur les machines tournantes, avec une expérimentation en 1885, puis une théorie sur le moteur asynchrone en avril 1888. En 1889, Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski, électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil qui sera construit industriellement à partir de 1891. [WIKI, 01]

### I.2.3 Lois générales de la conversion électromécanique

Les machines électriques tournantes convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique et inversement : ce sont les générateurs (électriques) ou les moteurs. On rencontre :

En courant continu :

– les machines à courant continu : moteur, génératrice (dynamo).

En courant alternatif :

– les machines synchrones : moteur synchrone, génératrice (alternateur).

– les machines asynchrones : moteur asynchrone, génératrice asynchrone.

Il s'agit d'une conversion d'énergie qui s'effectuera, bien évidemment, avec un rendement inférieur à un en raison des pertes inévitables.

L'exemple théorique suivant permet de matérialiser les diverses lois qui règlent cette conversion. Un conducteur de longueur  $l$ , mobile, se déplace à la vitesse  $v$  sur deux rails indéfinis placés dans une induction uniforme et invariable  $B$ , normale aux conducteurs. On exerce la force mécanique  $F_m$  sur le conducteur et le circuit est alimenté par un générateur de f.é.m.  $E_0$  et de résistance interne  $R$ . On note  $I$  le courant, avec les conventions de signes indiqués sur la Figure I.1. [CHE, 01]

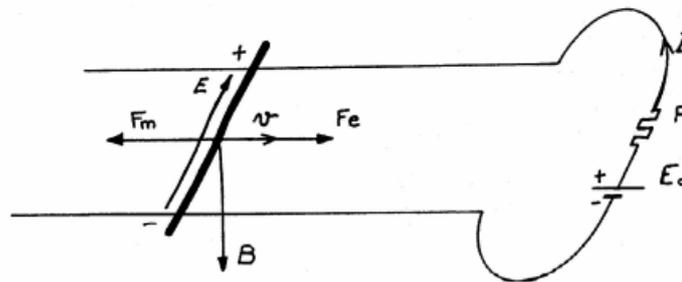


Figure I.1. Principe du générateur d'énergie électrique.

Quatre lois déterminent le système électromécanique :

✓ La loi de Faraday : si la vitesse du conducteur est  $v$ , il apparaît une f.é.m.  $E$  :

$$E = B * l * v \quad (I.1)$$

✓ La loi de Laplace : si le courant dans le conducteur est  $I$ , il existe une force électromagnétique  $F_e$  :

$$F_e = B * l * I \quad (I.2)$$

✓ La loi d'Ohm :

$$E_0 = E + R * I \quad (I.3)$$

✓ La loi de la dynamique : si la vitesse  $v$  est constante, elle implique :

$$F_m = F_e \quad (I.4)$$

Si la résistance est nulle (aucune perte dans le circuit) on a alors :

- une vitesse  $v$  telle que :

$$E = E_0 \tag{I.5}$$

Un courant  $I$  tel que :

$$F_e + F_m \tag{I.6}$$

Les vitesses sont liées aux f.é.m. et les courants aux forces.

Le fonctionnement sera moteur si  $F_e$  et  $v$  sont de même sens (ce sont les conventions de la figure). La f.é.m.  $E$  s'oppose alors au courant.

Si la vitesse est dans le sens de la force appliquée  $F_m$ , on obtient un générateur électrique; la force électrique  $F_e$  s'oppose alors à  $F_m$ . [CHE, 01]

On peut exprimer la puissance au niveau du conducteur sous la forme mécanique ou sous la forme électrique :

$$P = F_e v = B * l * I * \frac{E}{Bl} = E * I \tag{I.7}$$

C'est la puissance électromagnétique. On notera que la conversion d'énergie est parfaitement réversible. [CHE, 01]

Remarque : On peut aussi imaginer que l'on translate l'induction magnétique  $B$  à la vitesse  $v_s$  en exerçant une force  $F_e$ , le circuit étant alors refermé sur  $R$ , comme on le voit sur la figure I.2. Le conducteur, étant balayé par l'induction, donne naissance à une f.é.m.  $E$  qui engendre le courant  $I$ . Il apparaît alors une force  $F_e$  qui entraîne le conducteur dans le sens de  $v_s$ . Soit  $v$  la vitesse du conducteur :

$$E = B * l * (v_s - v) \tag{I.8}$$

$$F_e = F_m = B * l * I = B * l * \frac{E}{R} \tag{I.9}$$

D'où :

$$F_m = \frac{B^2 * l^2}{R} (v_s - v) \tag{I.10}$$

Le conducteur est entraîné dans le sens de  $v_s$  mais à une vitesse inférieure  $v$ . C'est le principe du moteur asynchrone. [CHE, 01]

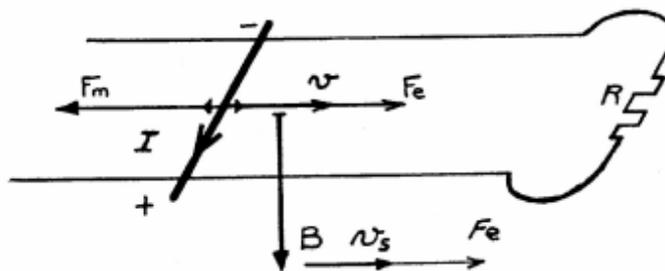


Figure I.2. Principe du moteur électrique.

## I.3 Types de la machines électriques

### I.3.1 Machines à courant continu

Une machine à courant continu est une machine électrique. Il s'agit d'un convertisseur électromécanique permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant continu et un dispositif mécanique ; selon la source d'énergie. [WIKI, 02]

Inventée par Zénobe Gramme et présentée à l'Académie des Sciences, à Paris, en 1871, c'était au départ un simple générateur de courant continu.

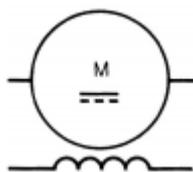
Les dynamos à courant continu ont été les premiers convertisseurs électromécaniques utilisés. Leur usage est en régression très nette en particulier en tant que générateurs de courant. On utilise de préférence des redresseurs à semi-conducteurs alimentés par des alternateurs.

Les moteurs à courant continu restent très utilisés dans le domaine de l'automobile (ventilateurs, lève-vitre, etc.) ainsi qu'en tant que « moteur universel » dans l'électroménager et l'outillage. Dans le domaine des puissances supérieures au mégawatt, les sous-marins seront les seuls utilisateurs de machines à courant continu afin d'assurer leur propulsion. En effet, pour éviter de « rayonner » du 50 ou du 60 Hertz qui les rendrait facilement détectables, les sous-marins utilisent des circuits de distribution de l'énergie électrique à tensions continues. [WIKI, 02]

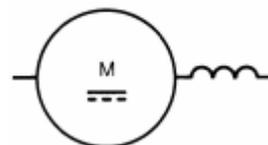
La fabrication de machine à courant continu de puissance supérieure à 10MW se heurte à une frontière technologique infranchissable. En effet, les problèmes d'injection de courant par les contacts balais - collecteur posent des problèmes insolubles au dessus de ce seuil de puissance. [WIKI, 02]

#### I.3.1.1 Symboles

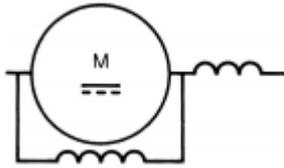
Voici les différents symboles employés pour représenter la machine à courant continu, selon qu'elle fonctionne en génératrice (dynamo) ou en moteur et selon le type d'excitation employée.



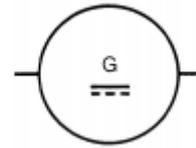
(a) Moteur à courant continu  
à excitation indépendante.



(b) Moteur à courant continu  
à excitation série.



(c) Moteur à courant continu  
à excitation composée.



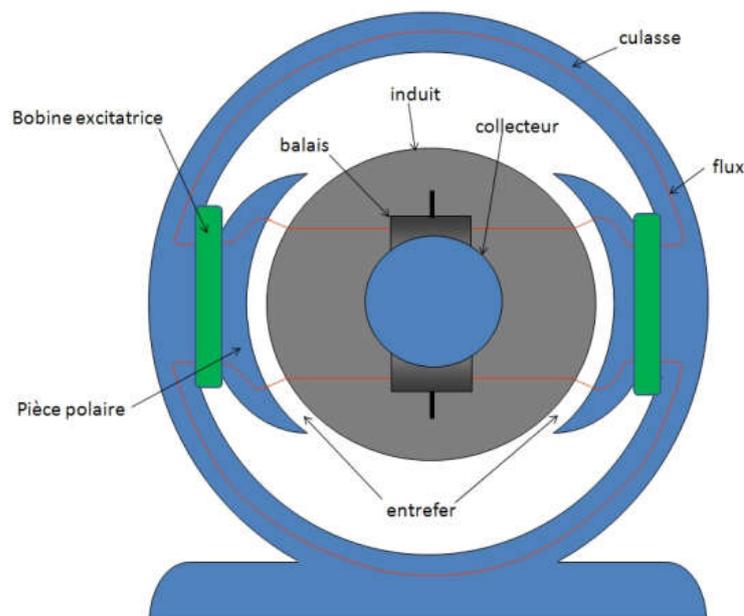
(d) Symbole d'une dynamo, machine  
à courant continu fonctionnant en génératrice.

**Figure I.3.** Symboles de la machine à courant continu.

### I.3.1.2 Constitution d'une machine à courant continu

Une machine à courant continu comprend quatre parties principales :

- l'inducteur ;
- l'induit ;
- le collecteur ;
- les balais également appelés charbons. [CHE, 01]



**Figure I.4.** Constitution d'une machine à courant continu.

#### (A) L'inducteur

Le bobinage inducteur, traversé par le courant inducteur  $I_e$ , produit le flux magnétique dans la machine. Il est constitué d'un électro-aimant qui engendre la force magnétomotrice (F.M.M.) nécessaire à la production du flux. Dans les machines bipolaires (à deux pôles), deux bobines excitatrices sont portées par deux pièces polaires montées à l'intérieur d'une culasse. La culasse

est généralement en fonte d'acier, tandis que les pièces polaires sont formées de tôles d'acier doux, voir Figure I.5. [CHE, 01]



**Figure I.5.** Culasse, circuit magnétique statorique d'une machine à courant continu.

### **(B) L'induit**

L'induit est composé d'un ensemble de bobines identiques réparties uniformément autour d'un noyau cylindrique. Il est monté sur un arbre et tourne entre les pôles de l'inducteur.

L'induit constitue un ensemble de conducteurs qui coupent les lignes de champ magnétique. Les bobines sont disposées de telle façon que leurs deux côtés coupent respectivement le flux provenant d'un pôle nord et d'un pôle sud de l'inducteur. [CHE, 01]

Le noyau est formé d'un assemblage de tôles en fer doux. Ces tôles sont isolées électriquement les unes des autres et portent des encoches destinées à recevoir les bobines.



**Figure I.6.** Encoche sur l'induit destinée à recevoir les conducteurs dits actifs.

Les conducteurs de l'induit sont parcourus par le courant absorbé ou débité par la machine. Ils sont isolés du noyau par des couches de feuilles isolantes, voir Figure I.7. Pour résister aux forces centrifuges, ils sont maintenus solidement en place dans les encoches au moyen de cales en fibre de verre. Si le courant est inférieur à une cinquantaine d'ampères, on emploie des conducteurs ronds. Au delà de 50 A, les conducteurs sont rectangulaires, ce qui permet une meilleure utilisation du volume de l'encoche. [CHE, 01]



**Figure I.7.** Mise en place des conducteurs d'induit dans les encoches et soudure de ceux-ci sur le collecteur.

### (C)Collecteurs et balais

Le collecteur est un ensemble cylindrique de lames de cuivre isolées les unes des autres par des feuilles de mica. Le collecteur est monté sur l'arbre de la machine, mais isolé de celui-ci. Les deux fils sortant de chaque bobine de l'induit sont successivement et symétriquement soudés aux lames du collecteur.

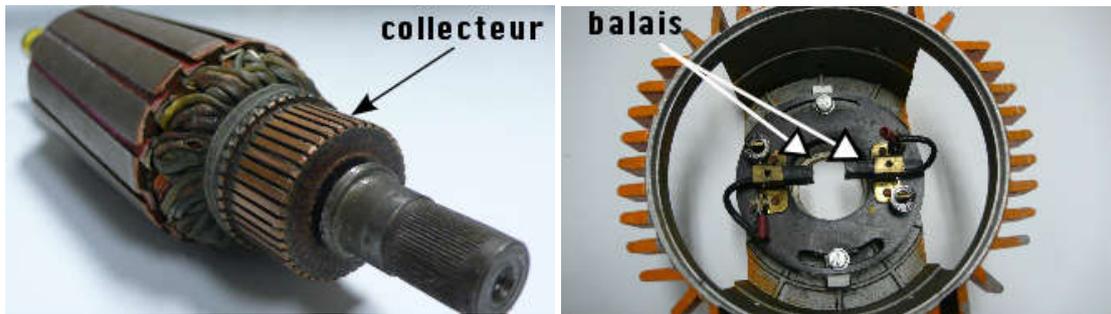
Dans une machine bipolaire, deux balais fixes et diamétralement opposés appuient sur le collecteur. Ainsi, ils assurent le contact électrique entre l'induit et le circuit extérieur. La construction du collecteur relève de la mécanique de précision. Les machines multipolaires ont autant de balais que de pôles. [CHE, 01]

Les balais permettent l'injection ou la collecte du courant sur le collecteur.

Lors de la construction des premières machines à courant continu, les balais étaient constitués de fils de cuivre disposés comme la paille de riz ou les branches sur les balais pour nettoyer, d'où le nom de balais. Les balais (aussi appelés « charbon ») sont en carbone (on choisit souvent du graphite). [CHE, 01]

D'une part, ce matériaux possède une bonne conductivité d'autre part, le frottement du couple cuivre/carbone est faible et ainsi, le collecteur ne s'use pas prématurément. La pression

des balais sur le collecteur peut être réglée par des ressorts ajustables. Pour les intensités très importantes, on utilise plusieurs balais connectés en parallèle.



**Figure I.8.** Système balais-collecteur d'une machine à courant continu.

### I.3.1.3 Modes d'excitation des machines à courant continu

- ✓ Excitation séparée
- ✓ Excitation shunt
- ✓ Excitation série
- ✓ Excitation composée.

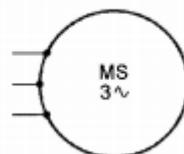
### I.3.2 Machines synchrones

La machine synchrone est le plus souvent utilisée en générateur, on l'appelle alors alternateur. Les centrales de production d'énergie électrique sont équipées d'alternateurs triphasés. De l'alternateur de bicyclette délivrant seulement quelques watt à l'alternateur de centrale nucléaire fournissant 1,6 GW le principe de fonctionnement et les modélisations classiques sont relativement semblables.

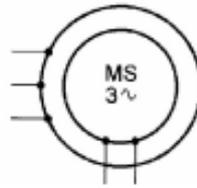
Comme toutes les machines électriques tournantes, la machine synchrone est réversible et peut également fonctionner en moteur synchrone. Dans une première partie l'alternateur sera présenté de façon très simple. [WIKI, 03]

#### I.3.2.1 Symboles

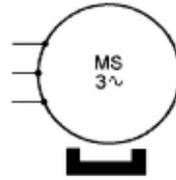
Les différents symboles utilisés pour représenter la machine synchrone, qu'elle fonctionne en moteur ou en génératrice (alternateur) sont donnés à la figure I.9



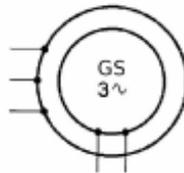
(a) Symbole général d'un moteur synchrone.



(b) Symbole d'un moteur synchrone triphasé à rotor bobiné.



(c) Symbole d'un moteur synchrone triphasé à aimants.



(d) Symbole d'un alternateur triphasé à rotor bobiné.

**Figure I.9.** Symboles de la machine synchrone.

### I.3.2.2 Constitution d'une machine synchrone

Quelque soit sa constitution et son nombre de pôles, une machine synchrone est constituée de deux circuits indépendants :

#### (A) L'induit (stator)

L'induit comprend un circuit magnétique constitué par un empilage de tôles en forme de couronne, isolées les unes des autres pour limiter les courants de Foucault.

L'ensemble des couronnes avec leur isolation est fortement serré, il constitue le circuit magnétique du stator. Dans sa partie intérieure, le circuit magnétique comporte des encoches uniformément réparties dans lesquelles vient se loger l'enroulement triphasé du stator. Le circuit magnétique du stator est en fer afin d'augmenter le champ magnétique engendré par le rotor, il supporte le bobinage du stator. Le bobinage d'un stator triphasé comprend trois bobines décalées l'une par rapport à l'autre de  $120^\circ$ .

Les deux extrémités de l'enroulement aboutissent chacune à une borne à la plaque de bornes de la machine. Elles constituent l'entrée et la sortie de l'enroulement. Elles ne sont pas connectées ensemble : l'enroulement est ouvert. C'est à l'utilisateur de réaliser le couplage.

Parce que l'induit est fixe, on peut isoler fortement ses conducteurs ; aussi, construit-on des alternateurs qui produisent des f.é.m. atteignant jusqu'à 15 000 volts. [CHE, 01]

### **(B)L'inducteur (rotor)**

L'inducteur est la partie mobile du moteur synchrone. Couplé mécaniquement à un treuil d'ascenseur par exemple, il va créer un couple moteur capable de fournir un travail de montée et de descente de la cabine d'ascenseur. Il se compose essentiellement d'une succession de pôles Nord et Sud intercalés sous forme d'aimants permanents ou de bobines d'excitation parcourues par un courant continu. On distingue donc deux types de moteurs : [CHE, 01]

- à aimants permanents,
- à rotor bobinés.

#### ✓ **Rotor à aimant permanent**

Ce sont des moteurs qui peuvent accepter des courants de surcharge importants pour démarrer rapidement. Associés à des variateurs de vitesse électronique, ils trouvent leur place dans certaines applications de motorisation d'ascenseurs lorsque l'on cherche une certaine compacité et une accélération rapide (immeuble de grande hauteur par exemple).

#### ✓ **Rotor bobiné**

Ce type de machines est réversible car elles peuvent fonctionner en régime moteur comme en régime alternateur. Pour les moyennes et grosses puissances, les moteurs synchrones à rotor bobiné, associé avec un variateur de vitesse, sont des machines performantes.

L'inducteur est composé d'un empilement de disques ferromagnétiques. Comme dans l'induit du moteur, des enroulements sont logés dans des encoches pratiquées sur le rotor et reliés électriquement aux bagues de bout d'arbre. L'alimentation en courant continu s'effectue via l'ensemble bagues-balais.

### **I.3.2.3 Excitation de la machine synchrone**

L'inducteur doit être alimenté en tension continue. On peut utiliser :

- Une génératrice à courant continu auto-excitée.
- Un petit alternateur dont on redresse la tension.

On peut dans ce cas se passer de balais : l'alternateur d'excitation est à induit tournant ; sa tension, redressée par des diodes, excite l'inducteur tournant de l'alternateur principal comme le montre la figure I.10. Le courant  $I_e$  est fourni par un régulateur électronique chargé de maintenir

la tension de sortie constante, l'alternateur d'excitation sert en outre d'amplificateur de puissance.

Des redresseurs, commandés ou non, utilisant une tension alternative. Dans le cas d'un fonctionnement en alternateur, on peut utiliser la tension alternative produite ; on obtient un montage auto-excité qui obéit aux mêmes conditions d'amorçage que les génératrices à courant continu (présence de flux rémanent en particulier). [CHE, 01]

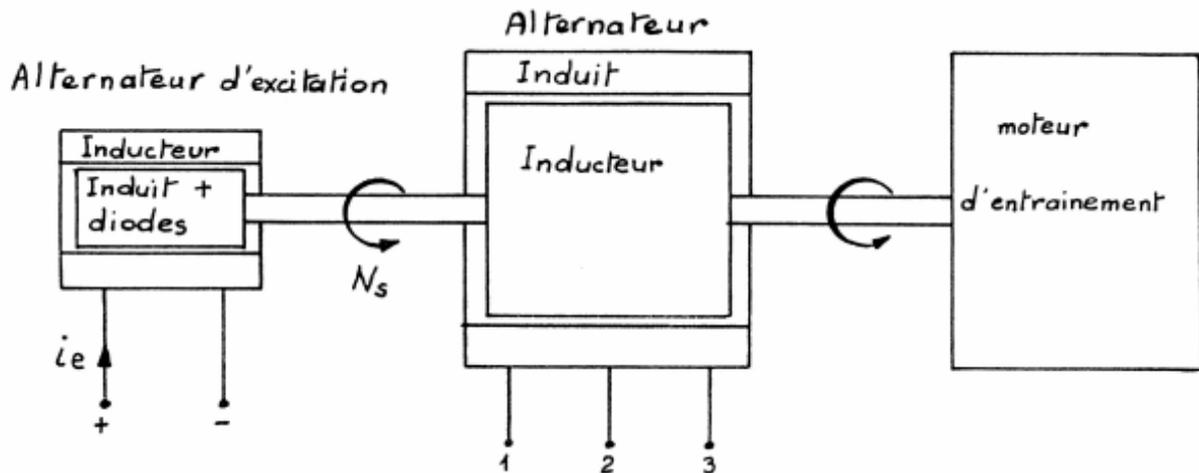


Figure I.10. Schéma de principe d'un alternateur triphasé sans bagues ni balais.

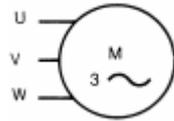
### I.3.3 Machines asynchrones

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 5 MW fournissent un surplus d'énergie active aussi bien sur des réseaux terrestres qu'à bord des navires.

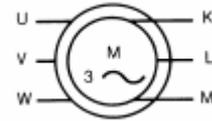
La gamme de puissance couverte par les machines asynchrones est très étendue : de quelques 5 watts pour des moteurs asynchrones monophasés à bagues de déphasage aux 36,8 MW des moteurs à cage d'écureuil des futurs porte-avions britannique de la classe « HMS Queen Elisabeth », en passant par les 24 MW des moteurs asynchrones à cage d'écureuil assurant la propulsion de la série de paquebots « Norwegian Epic ». [WIKI, 04]

#### I.3.3.1 Symboles

Voici les différents symboles employés pour représenter la machine asynchrone : [CHE, 01]



(a) Symbole du moteur  
asynchrone à cage d'écureuil.



(b) Symbole du moteur  
asynchrone à rotor bobiné.

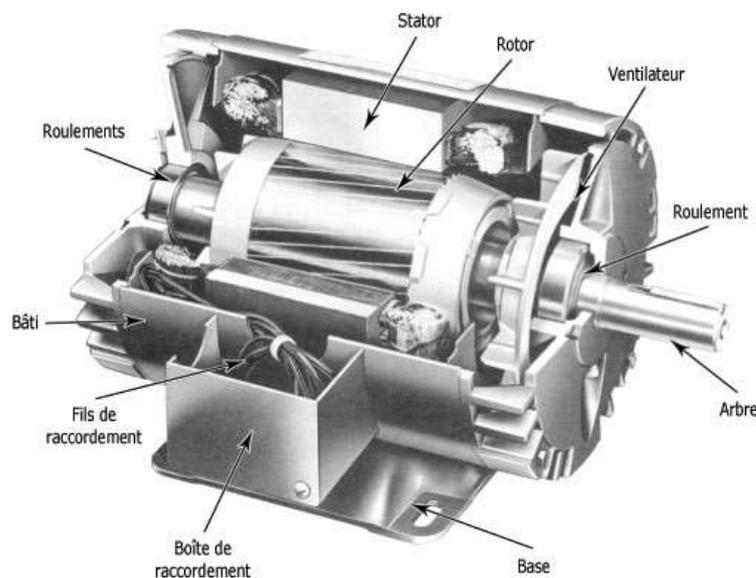
**Figure I.11.** Symboles du moteur asynchrone.

### I.3.3.2 Constitution d'une machine asynchrone

La machine asynchrone à cage est une machine électrique tournante assurant la tâche de la conversion d'énergie par induction électromagnétique. [CHE, 01]

Les parties constitutives de la machine asynchrone sont:

- Le stator: partie fixe de la machine, constituée de disques en tôles magnétiques portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.
- Le rotor: c'est la partie tournante où est constitué de disques en tôles magnétiques empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement injecté,
- Les organes mécaniques: permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous ensembles.

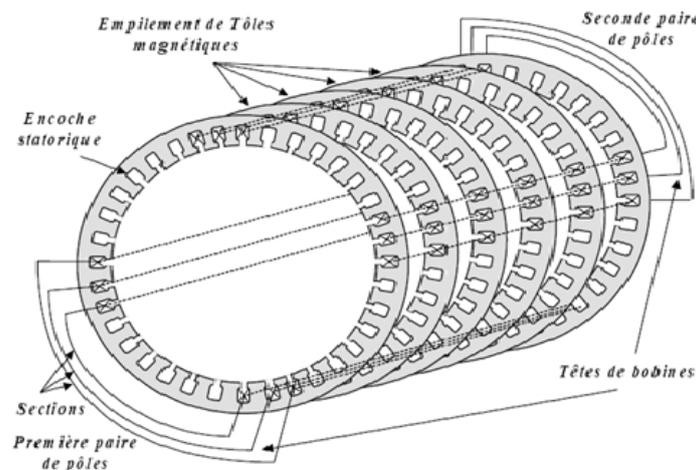


**Figure I.12.** Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.

#### (A) Le stator

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Le circuit magnétique est schématisé en figure I.12. Il est constitué d'un empilage de tôles minces découpées par des encoches parallèles à l'axe de la machine dont l'épaisseur varie entre 0÷50mm

pour minimiser les pertes dans le circuit magnétique [01]. Un bobinage statorique peut être décomposé en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique qui est à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant une circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre, afin d'obtenir une répartition sinusoïdale des forces magnétomotrices et du flux et limiter les ondulations du couple électromagnétique. [HAL 14]

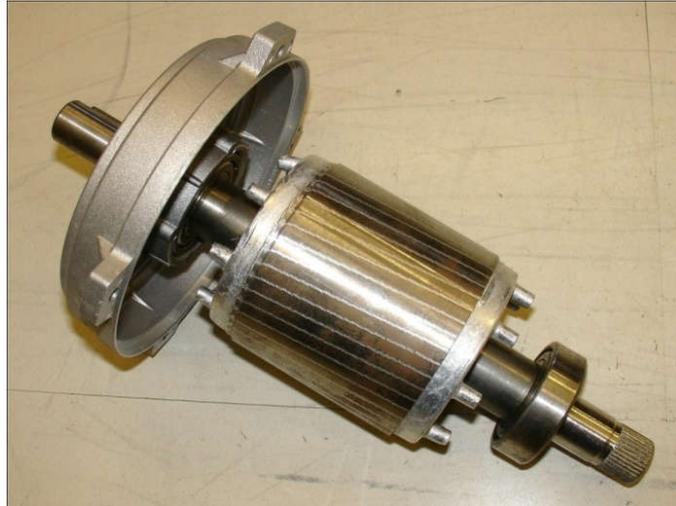


**Figure I.13.** Enroulements statoriques d'une phase d'une machine à 4 pôles.

### (B) Le rotor

Le circuit magnétique rotorique est constitué de tôles d'acier qui sont, en général, de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. Les rotors de machines asynchrones peuvent être de deux types : bobinés ou à cage d'écureuil. [HAL 14]

Les rotors bobinés sont construits de la même manière que le bobinage statorique (insertion des enroulements dans les encoches rotoriques). Les phases rotoriques sont alors disponibles grâce à un système de bagues balais positionné sur l'arbre de la machine. En ce qui concerne les rotors à cage d'écureuil (figure I.14), les enroulements sont constitués de barres en cuivre pour les gros moteurs ou en aluminium pour les petits moteurs. Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux dits "de court-circuit", eux aussi fabriqués en cuivre ou en aluminium. [KHA 07]



**Figure I.14.** Rotor à cage d'écurie d'une machine asynchrone.

### **(C) Les organes mécaniques**

La carcasse joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur.

L'arbre est un organe de transmission comprenant 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 généralement constitué en acier moulé ou forgé . Il est supporté par un ou plusieurs paliers.

Ces paliers soutiennent le rotor et assurent sa 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.

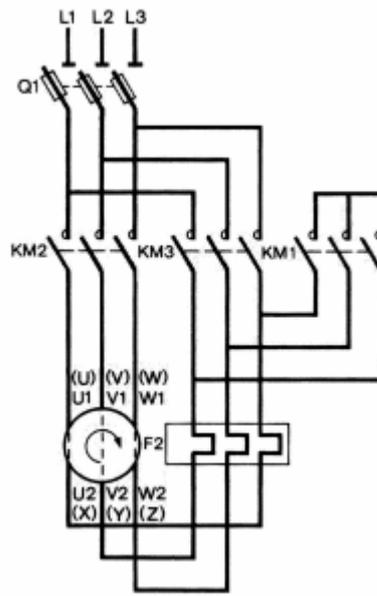
### **I.3.3.3 Démarrage du moteur asynchrone**

#### **✓ Démarrage direct**

Si le réseau le permet, on peut démarrer un moteur en le branchant directement à l'aide d'un contacteur sur le réseau. Le courant de pointe au démarrage,  $I_D$ , est alors de 6 à 7 fois le courant nominal. Sur des réseaux où l'absorption d'un tel courant de démarrage peut entraîner un creux de tension préjudiciable (réseau peu « puissant » du type de ceux des navires) il est nécessaire de prévoir des dispositifs de démarrage dont le but est de réduire le courant absorbé lors du démarrage. [CHE, 01]

### ✓ Démarrage étoile-triangle

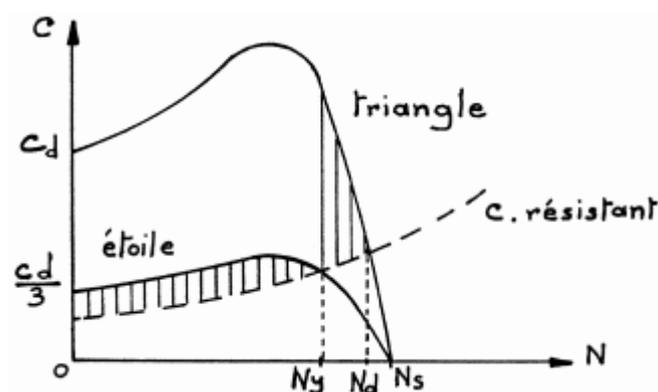
On utilise un moteur qui doit être normalement couplé en triangle sur le réseau. Un commutateur permet de brancher, pendant le démarrage, le stator en étoile. Chaque enroulement, placé sous la tension  $V = \frac{U}{\sqrt{3}}$  absorbe un courant divisé par  $\sqrt{3}$ . Du fait du couplage, le courant de ligne est divisé par 3 par rapport au cas précédent. [CHE, 01]



**Figure I.15.** Démarrage étoile-triangle d'une machine asynchrone.

Comme la tension aux bornes d'un enroulement est divisée par  $\sqrt{3}$ , le couple est lui aussi divisé par 3. Il faut donc que le couple obtenu au démarrage reste supérieur au couple résistant.

A la fin du démarrage en étoile, on obtient la vitesse  $N_y$  ; on commute les enroulements en triangle et la vitesse tend vers  $N_d$ . Ce mode de démarrage est très simple mais conduit à un faible couple au démarrage et à un brutal régime transitoire lors du passage d'étoile à triangle. [CHE, 01]



**Figure I.16.** Caractéristique mécanique lors d'un démarrage étoile-triangle.

### ✓ Démarrage par impédances statoriques

On réduit la tension stator en insérant, lors du démarrage, des résistances ou des inductances en série avec les enroulements du stator comme le montre la Figure I.18. Le couple au démarrage est réduit dans un rapport réglable. Ce mode de démarrage est plus souple : on peut fractionner les impédances et les court-circuiter progressivement. [CHE, 01]

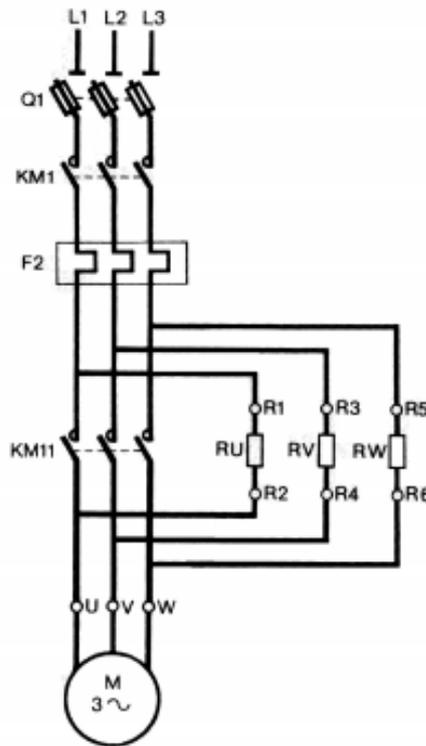


Figure I.17. Démarrage par insertion de résistances statoriques.

### ✓ Démarrage par résistances rotoriques

Les procédés précédents étaient utilisables, que le moteur soit à cage ou à rotor bobiné. Dans ce dernier cas, on peut utiliser un rhéostat rotorique qui agit sur le glissement : si  $R_2$  augmente, on peut alors augmenter le couple au démarrage et réduire l'appel du courant. [CHE, 01]

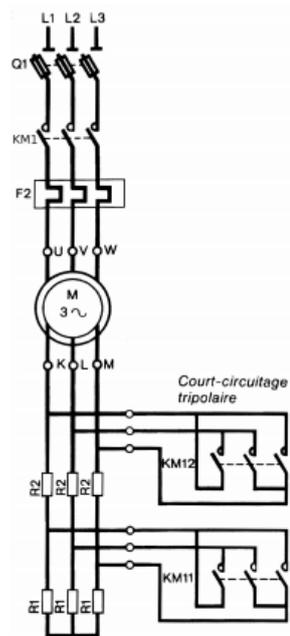


Figure I.18. Démarrage en trois temps par insertion de résistances rotoriques.

I.4 Comparatif des machines électriques

	Moteur à courant continu	Moteur synchrone	Moteur asynchrone
Dénomination condensée	MCC	MS	MAS
Constitution du stator	-Enroulements inducteurs (machines de forte puissance jusqu'à plusieurs MW)- Aimants (machines jusqu'à quelques kW).	-Enroulements statoriques triphasés pour la production du champ tournant.	-Enroulements statoriques triphasés pour la production du champ tournant.

<p>Constitution du rotor</p>	<p>-Enroulements rotoriques d'induit constitués de conducteurs de forte section car les courants d'induit sont importants (limitation en augmentant le nombre de voie d'enroulements).</p>	<p>- Enroulements d'excitation (électroaimant) pour les machines de forte puissance (moteurs ou alternateurs). - Aimants (machines jusqu'à quelques kW).</p>	<p>-Enroulements rotoriques (machines à bagues) : forte puissance, circuit électrique accessible pour modifier le comportement de la machine (pilotage par le rotor). - Rotor à cage pour des machines simples, robustes pilotables par le stator.</p>
<p>Vitesse du rotor</p>	<p>Variable suivant la tension d'induit, mais limitée en raison des commutations de courant au niveau du collecteur.</p>	<p>Variable de l'arrêt jusqu'à une vitesse maximale réglée par la fréquence des grandeurs statoriques (directement proportionnelle).</p>	<p>Variable de l'arrêt jusqu'à une vitesse maximale réglée par la fréquence des grandeurs statoriques (au glissement près).</p>
<p>Conséquence d'une augmentation du couple de charge</p>	<p>Diminution de la vitesse rotorique. Limitation par le dépassement du courant maximal d'induit.</p>	<p>Pas de diminution de la vitesse rotorique (synchronisme) en contrôlant l'angle interne. Perte de contrôle au delà d'une limite.</p>	<p>Augmentation du glissement provoquant une diminution de la vitesse de rotation.</p>

Rendement	Moyen	Bon (98,5% pour les gros alternateurs)	Moins bon que la MS (pertes rotoriques).
Inconvénients	Entretien du système balais-collecteur (forte dégradation).	- Entretien des bagues pour les moyens/gros moteurs (électro-aimant). -Décrochage si trop de couple demandé. - -Démarrage direct sur le réseau impossible.	- Dépendance entre la vitesse et la charge. 2. Pointe de courant au démarrage.
Avantages	Commande simple du couple et de la vitesse de manière indépendante.	Vitesse fixée (invariante avec la charge)	Robuste, peu d'entretien.
Utilisations	-Production d'énergie (génératrices). -Application nécessitant une vitesse stable en fonction de la charge. -Moteurs brushless, pas à pas.	-Production d'énergie (alternateurs). -Application nécessitant une vitesse stable en fonction de la charge. -Moteurs simples : brushless, pas à pas.	-Grand standard industriel. - Entraînements divers. - Alternateurs en site isolé (éolienne, microcentrale hydraulique).

**Tableau I.1 :** Comparaison entre les différents types des machines électriques.

### I.5 Conclusion

Ce chapitre a été, essentiellement dédié à l'état de l'art des différents types des machines électrique et sont principaux constitution .Après ca en a rappeler pour les méthodes d'excitation pour la machine a courant continu et la machine synchrone et les méthodes de démarrage pour la machine asynchrone .Enfin un panorama sur la comparaison entre les machines et sons avantages et les inconvénients.

## **II.1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous rappelons les différents défauts sur la machine asynchrone, et, ensuite les diverses techniques de traitement pouvant être utilisées pour la détection d'un défaut électrique ou mécanique. Après cela, nous discutons les méthodes de diagnostic actuellement appliquées à la machine asynchrone.

## **II.2 Définition de quelques termes liés au diagnostic**

### **✓ Défaillance**

Événement engendrant une modification du fonctionnement du procédé. L'état du système ne correspond plus à un fonctionnement normal, le système n'est plus apte à assurer totalement sa fonction.

### **✓ Défaut**

Est une déviation non permise d'au moins une propriété ou un paramètre caractéristique du système par rapport à un comportement usuel, nominal ou acceptable.

### **✓ Diagnostic**

Ensemble d'actions visant à évaluer l'état d'un procédé à partir de la connaissance de son fonctionnement. A partir de l'observation du procédé, on détermine par comparaison avec les divers états de fonctionnement connus (ou un raisonnement logique) le degré de défaillance du système, l'origine de ses défaillances et leurs causes.

### **✓ Disponibilité**

Faculté d'un matériel ou d'un système à pouvoir fonctionner chaque fois que cela est nécessaire et chaque fois qu'on le sollicite; on assure ainsi une fiabilité totale pendant les phases de fonctionnement. La disponibilité nécessite des opérations de maintenance préventive afin de prévoir tout vieillissement ou défaillance.

### **✓ Fiabilité**

Capacité d'un système à fonctionner pendant un certain temps sans panne, elle se caractérise par le temps moyen de bon fonctionnement.

### **✓ La Maintenance**

La tâche principale d'un ingénieur est de garantir la disponibilité des systèmes industriels, c'est-à-dire, d'assurer que le système fonctionne lorsqu'on le sollicite. La responsabilité de cette tâche repose sur la maintenance. Selon l'association française de normalisation (AFNOR), la maintenance est « ensembles des activités destinées à maintenir

ou à établir un bien dans un état pour accomplir une fonction requise » [02]. Il y a deux grandes classes de la maintenance :

- ✓ Maintenance corrective.
- ✓ Maintenance préventive : - systématique.  
- conditionnelle.

➤ **Maintenance corrective**

C'est un ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien. Autrement dit, la maintenance corrective est effectuée après la détection d'une panne : Elle devra s'appliquer automatiquement aux défaillances complètes et soudaines. Ce type de maintenance sera réservé aux matériels peu coûteux, non stratégiques pour la production et dont la panne aurait peu d'influence sur la sécurité. [03]

➤ **Maintenance préventive**

Ce type de maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance. Elle doit permettre d'éviter les défaillances des équipements au cours de l'utilisation. La mise en pratique de ce type de maintenance nécessite la décomposition des sous-systèmes en composants (roulement, circuit magnétique, etc...). Les buts de la maintenance préventive, sont : [03]

- ✓ Augmenter la durée de vie des équipements.
- ✓ Diminuer le budget de la maintenance.
- ✓ Supprimer les causes des accidents graves.

- **Maintenance préventive systématique**

La maintenance systématique est un type de maintenance planifiée dans le temps (graissage, lubrification, nettoyage, dépoussiérage, calibrage,...). Il s'agit là d'éviter les causes de défaillances et de vieillissement des composantes du système.

Généralement, la maintenance préventive systématique s'adresse aux éléments dont le coût des pannes est élevé, mais ne revenant pas trop cher en changement (les meilleurs exemples sont le changement systématique de l'huile, des filtres, changement de la courroie de synchronisation, des roulements, des paliers de rotation ...).

- **Maintenance préventive conditionnelle**

C'est un type de maintenance déclenché suite à un symptôme observable (température, vibration, jeu excessif, ...) permettant de prédire une défaillance prochaine. Il s'agit là d'intervenir juste avant que la panne ne survienne. La maintenance préventive conditionnelle est réalisée dès lors qu'une mesure dépasse une valeur précise (seuil) d'une grandeur physique (température, pression...).

**✓ Maintenabilité**

La maintenabilité caractérise la facilité de maintenance du procédé, elle peut être largement augmentée par la mise en œuvre d'un système de diagnostic.

**✓ Sécurité**

Ce terme regroupe les caractéristiques concernant l'utilisation du procédé et ses dangers potentiels pour l'utilisateur ou pour le matériel.

**✓ Sûreté**

La sûreté regroupe les notions de disponibilité, fiabilité, maintenabilité et sécurité du système ; elle caractérise la confiance que l'on peut apporter au fonctionnement.

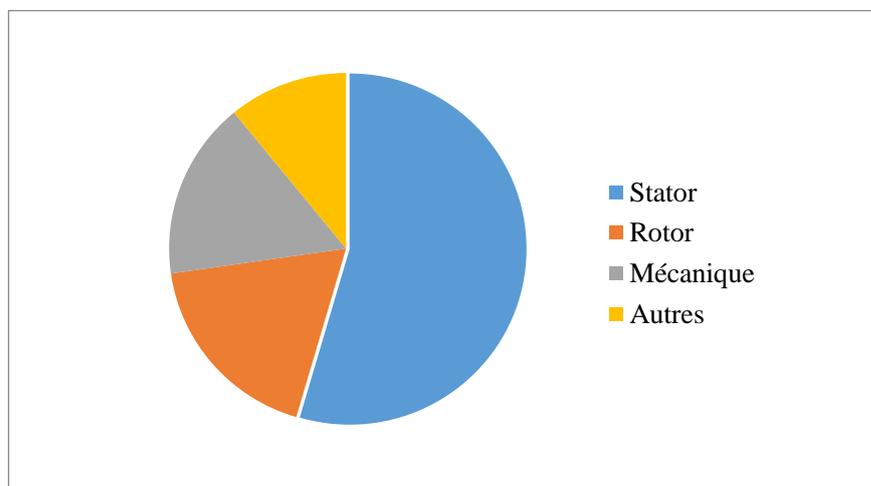
**II.3 Les défauts de la machine asynchrone**

Réputée pour être robuste, la machine asynchrone n'est jamais à l'abri des défaillances, ces anomalies donnent lieu à un comportement anormal de la machine et peuvent à court ou à long terme provoquer son endommagement. Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques. [04]:

**II.3.1 L'étude statistique des défauts**

Une étude statistique est effectuée en 1998, par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels, sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50kW à 200kW) a donné les résultats suivants ; [05].

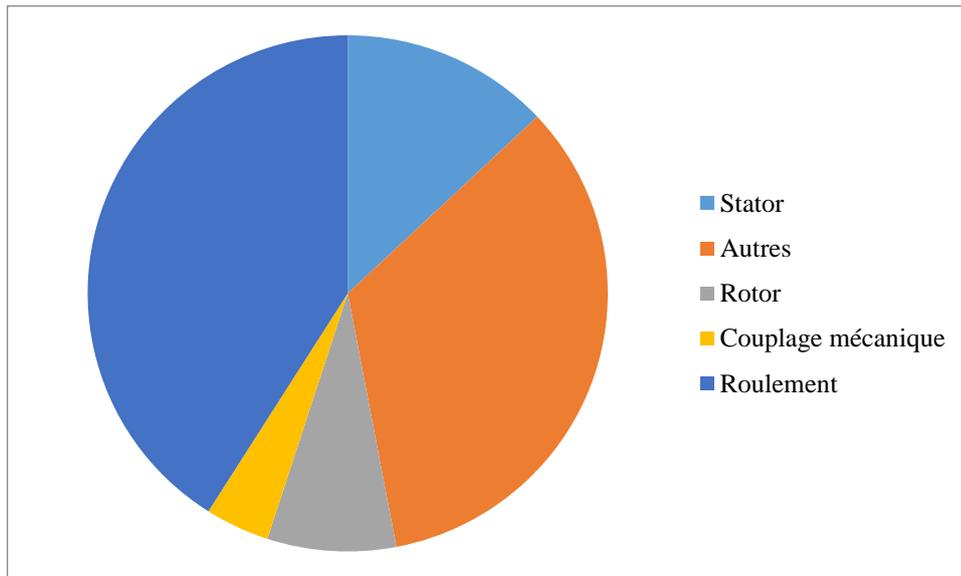
Stator	60 %
Rotor	20 %
Mécanique	18 %
Autres	12 %



**Figure II.1.** Répartition des défauts pour une machine de moyenne puissance

Une autre étude statistique a été faite sur les machines de grande puissance (de 100kW à 1MW) a donné les résultats suivants ; [05].

Stator	13 %
Autres	34 %
Rotor	08 %
Couplage mécanique	04 %
Roulement	41 %



**Figure .II.2.**Répartition des défauts pour une machine de grande puissance

Il est à noter que les techniques d'alimentation des machines électriques provoquent aussi des défaillances, par exemple, les enroulements sont excités par des tensions comprenant des fronts raides ce qui accélère le vieillissement de l'isolation du bobinage statorique.

Les causes des défauts au stator et au rotor sont multiples [06], les plus fréquentes d'entre eux sont énumérées ci-dessous :

➤ Défauts statoriques :

- court-circuit entre spires : surtension, température excessive, vibration, humidité.
- court-circuit entre phases : haute température, alimentation déséquilibrée, défaut d'installation.
- défaut d'isolation : démarrage fréquent, décharge partielle, condition, température et humidité extrême.
- défaut entre le stator et carcasse : cycle thermique, abrasion de l'isolant, encrassement des spires par la carcasse, présence des points anguleux dans les encoches, choc.
- déplacement des conducteurs : démarrage fréquent, vibration de tête de bobines

- défaillance des connecteurs : vibration excessive.
- vibration de la carcasse : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, déséquilibre d'alimentation, surcharge, mouvement des enroulements, contact avec le rotor.

➤ Défauts rotoriques :

- défaut de roulements : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, haute température, perte de lubrifiant, charge déséquilibrée, corrosion.
- rupture de barres : cycle thermique, régime transitoire à longue durée ; déséquilibre magnétique.
- rupture d'une portion d'anneau : cycle thermique.
- excentricité : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, défauts des roulements.
- désalignement des roulements : défaut de couplage, mauvaise installation, surcharge.
- défaut du circuit magnétique : défaut de fabrication, surcharge, cycle thermique.
- déséquilibre mécanique : mauvais alignement, mouvement des anneaux de court-circuit.

Une description succincte de défauts les plus courants est donnée dans les paragraphes suivants :

### **II.3.2 Défauts statoriques**

Les défauts au stator représentent environ de 40% à 60% des défauts des machines à induction [07]. La majeure partie de défauts statoriques est attribuée à la dégradation d'isolants. L'enroulement statorique d'une machine électrique est soumis à des efforts induits par une variété de facteurs, parmi les plus importants, une surcharge thermique, les vibrations mécaniques, les pics de tension provoqués par le réglage de fréquence, etc. Les causes les plus fréquentes des défauts d'enroulement statorique sont [08], [09], [10]:

- Vieillesse naturelle des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation normale, l'isolant finit naturellement par se dégrader.
- Échauffement excessif du noyau et des enroulements du stator.
- Fissures dans la tôle, de fixation, et des jonctions.
- Mauvaise connexion des têtes des enroulements.
- Fonctionnement dans un environnement sévère, contamination provoquée par l'humidité et la saleté.
- Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge.
- Décharges électriques.

- Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- Fuites dans les systèmes de refroidissement.

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit: défaut d'isolant, court-circuit entre spires, court-circuit entre phases, court-circuit entre phase et armature, déséquilibre d'alimentation, défaut de circuit magnétique.

### **II.3.2.1 Défauts d'isolant dans un enroulement**

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or, les matériaux d'isolation ont une limite mécanique, de température et de tension. Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné.

Lorsque le défaut de l'isolant se crée sur une spire, le courant de défaut circule entre le cuivre de cette spire et la tôle du stator (défaut phase - masse). Il peut aussi circuler entre deux spires d'une même phase si l'isolant qui les sépare est détérioré (défaut entre-spires). Dans le cas des bobinages à deux couches, une même encoche peut contenir des conducteurs de deux phases différentes. La détérioration simultanée et dans une même zone, des isolants de ces deux bobines provoque un contact électrique entre deux spires de deux phases différentes (défaut phase-phase). Ce type de défaut peut aussi exister dans les bobinages à une couche au niveau des têtes de bobines où les conducteurs de deux phases différentes peuvent entrer en contact. La topologie du circuit électrique est ainsi influencée par ces défauts [09], [10].

### **II.3.2.2 Un court-circuit entre spires de la même phase**

Le chauffage excessif provoqué par le court-circuit entre spires est la raison pour laquelle les moteurs tombent en panne presque toujours en quelques minutes, si ce n'est quelques secondes. Ainsi, chaque 10°C additionnel augmente la détérioration de l'enroulement deux fois plus rapidement que dans un fonctionnement à température normale [08]. Le défaut de court-circuit entre spires de la même phase est assez fréquent dans la machine asynchrone, ce défaut a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie aussi le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique [10], [11]. Donc, la conséquence est une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant encourager l'apparition d'un 2ème court-circuit, alors un défaut en chaîne. Par

contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations de couple liées au déséquilibre des courants de phases engendré par le défaut [09].

### II.3.2.3 Un court-circuit entre phases

Ce défaut peut arriver en tout point du bobinage, mais les plus fréquents apparaissent dans les têtes de bobines, puisque c'est dans celles-ci que les conducteurs de phases différentes se côtoient [09]. L'influence de ce type de défaut sur le fonctionnement de la machine dépend de la localisation du défaut (de la partie affectée). Si le court-circuit est proche de l'alimentation entre phases, il induit des courants très élevés qui conduisent à la fusion des conducteurs d'alimentation ce qui provoque un arrêt net de la machine [11]. Si le court-circuit est proche du neutre entre deux phases, il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de fusion des conducteurs. L'apparition de ce type de défaut dans le cas des machines asynchrones, provoque une augmentation des courants dans les barres ainsi que dans les anneaux du rotor à cage.

### II.3.2.4 Défauts du circuit magnétique

Les tôles du circuit magnétique sont feuilletées et isolées entre elles, cependant elles peuvent se retrouver court-circuitées. Les causes les plus fréquentes de défaut de circuit magnétiques sont généralement liées à un défaut sévère d'excentricité statique et/ou dynamique qui peut conduire à un contact front entre le stator et le rotor ce qui détruit le circuit magnétique, ou bien court-circuit des conducteurs qui peut également provoquer un échauffement local intense dans les tôles, ainsi la projection des corps étrangers dans l'entrefer peut entraîner l'abrasion des tôles et ainsi les court-circuitées [3].

## II.3.3 Défauts rotoriques

### II.3.3.1 Défauts de roulements

Comme il est indiqué sur la Figure II.1, la majorité des défauts dans les machines électriques concernent les défauts de roulements qui ont de nombreuses causes telles que l'écaillage de fatigue, la contamination du lubrifiant, une charge excessive [12] ou des causes électriques comme la circulation de courants de fuite induits par les onduleurs [13].

Les défauts de roulements entraînent de manière générale plusieurs effets mécaniques dans les machines tels qu'une augmentation du niveau sonore et l'apparition de vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinal de la machine [09]. Ce type de défaut

induit également des variations (oscillations) dans le couple de charge de la machine asynchrone. Le point ultime de roulements défectueux est le blocage du rotor.

### II.3.3.2 Excentricité

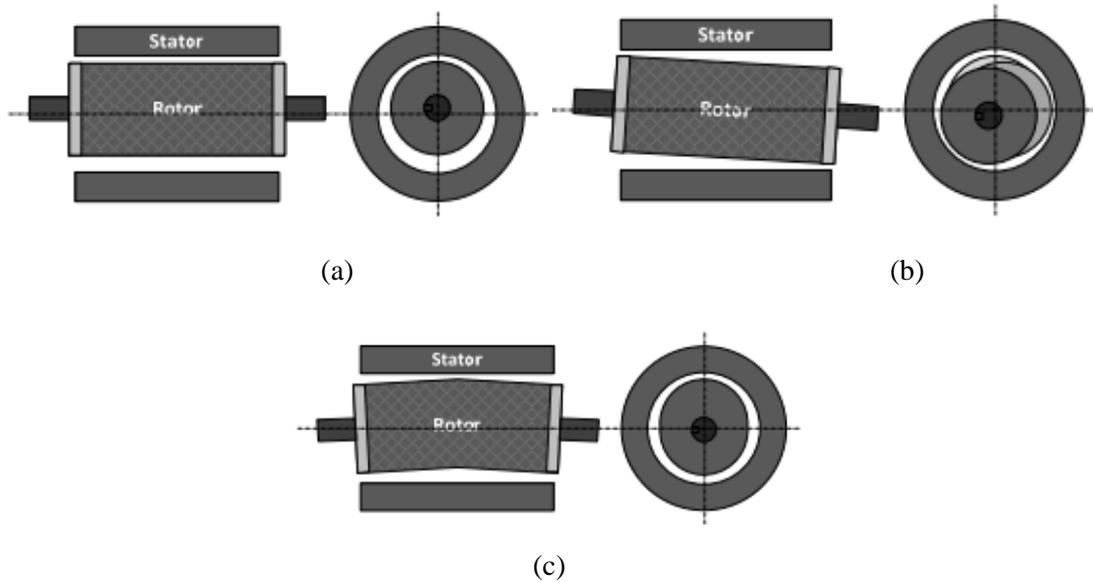
Les conséquences des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité [14]. L'excentricité d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe de sa fabrication. Celle-ci passe en effet par différentes étapes d'usinage et de montage qui induisent un décentrement du rotor par rapport au stator. Lors du fonctionnement de la machine, deux causes principales aggraveront l'excentricité. La première est inhérente à la chaîne cinématique dans laquelle la machine intervient et qui peut imposer une force radiale sur l'arbre de cette machine, qui va engendrer une usure des roulements et une amplification du décentrement. Le deuxième phénomène risquant d'aggraver l'excentricité est quant à lui inhérent au fonctionnement de la machine ; en effet, le décentrement génère un déséquilibre dans la distribution des efforts radiaux entre le stator et le rotor [15,16]. L'effort radial est maximal à l'endroit où se situe l'épaisseur minimale de l'entrefer et va tendre à diminuer encore plus la valeur de l'entrefer minimum et augmenter par conséquent encore plus le déséquilibre des efforts radiaux. Le point ultime de l'excentricité est le frottement du stator sur le rotor, qui est synonyme de destruction rapide de la machine.

Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées [17, 18] :

✓ L'excentricité statique (Figure II.3(a)) – généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. La cause principale c'est un défaut de centrage des flasques.

✓ L'excentricité dynamique (Figure II.3(b)) – correspond, elle à un centre de rotation du rotor différent du centre géométrique du stator, mais, de plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator [19]. Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes.

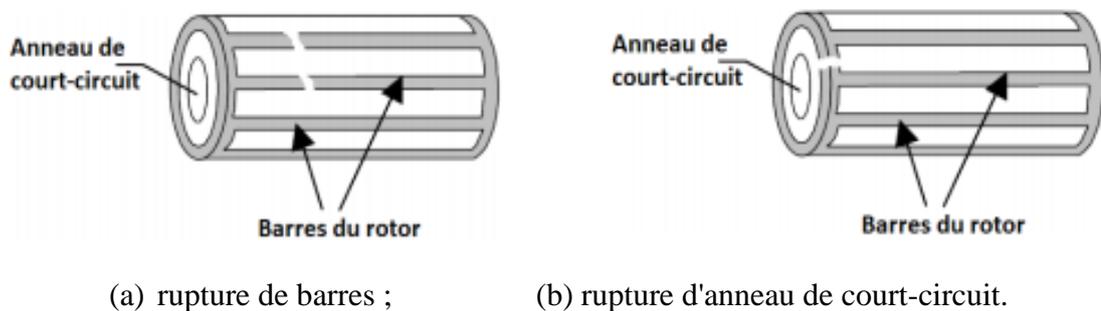
✓ L'excentricité mixte (Figure II.3(c)) – la somme des deux cas présentés ci-avant.



**Figure II.3.** Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte.

### II.3.3.3 Défauts de rupture de barres et d'anneau de court-circuit

Les mêmes défauts qu'au stator peuvent se retrouver dans un rotor bobiné. Pour une machine asynchrone avec un rotor à cage d'écurueil, les défauts se résument à la rupture de barres ou à la rupture d'anneaux de court-circuit (Figure II.4).



**Figure II.4.** Défaut d'un rotor à cage d'écurueil

Les ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, par exemple, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents, etc.), à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures) [10]. Cela fait apparaître des oscillations sur les courants et le couple électromagnétique d'autant plus apparentes que l'inertie est très grande (vitesse constante) [20, 21]. Si l'inertie de l'entraînement est plus faible, des oscillations apparaissent sur la vitesse mécanique et sur l'amplitude des courants statoriques.

La cassure de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres dans une machine asynchrone à cage. 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 rotoriques [22]. Il convient de mentionner, qu'un mauvais dimensionnement des anneaux, conduit à une détérioration des conditions de fonctionnement ou une surcharge de couple et, donc, à des courants pouvant entraîner leur cassure [22, 23].

L'apparition d'un défaut de rupture de barres n'induit pas à un arrêt de la machine, du fait que le courant qui traversait la barre cassée se répartit sur les barres adjacentes [23]. Ces barres sont alors surchargées, et les contraintes thermiques et électromécaniques engendrées peuvent conduire à leur rupture, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres pour provoquer l'arrêt de la machine.

Devant la multitude des défauts envisageables et les conséquences de leurs apparitions, les techniques de surveillance se sont rapidement imposées auprès des utilisateurs des machines électriques. Elles commencent également à intéresser les concepteurs.

## **II.4 Causes des défauts**

Les causes des défauts sont multiples, elles peuvent être classées en trois groupes :

Les initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, usure des éléments mécaniques (roulement à billes), rupture de fixation, problème d'isolation électrique, déséquilibre des tensions et courants de ligne.

Les contributions aux défauts : surcharge fréquente, température ambiante élevée, ventilation défaillante, humidité, fortes vibrations, vieillissement.

Les défauts et erreurs humaines : défauts de fabrication, composants défectueux, protection inadaptées, absence de maintenance.

Une classification des défauts qui existent dans les machines électriques selon leurs origines est présentée dans le Tableau II.1.

Défaillances des machines électriques	Interne	Mécanique	Contact entre le stator et rotor
			Défaillance de roulements
			Excentricité
			Mouvement des enroulements et des tôles
		Electrique	Défaillance au niveau de l'isolation
			Rupture de barre
	Défaillance au niveau du circuit magnétique		
	Externe	Mécanique	Charge oscillante
			Surcharge de la machine
			Défaillance de montage
		Environnementale	Humidité
			Température
			Propreté
		Electrique	Fluctuation de la tension
			Sources de tensions déséquilibrées
Réseau bruité			

Tableau II.1. Défauts des machines électriques selon leurs origines

**II.5 Méthodes de diagnostic des machines asynchrones**

Il existe une variété de techniques de diagnostic et de détection des défauts. On présente dans ce qui suit quelques-unes qui concernent la détection des défauts machine.

**II.5.1 L'estimation de paramètres physiques**

La détection et la localisation des défaillances par estimation paramétrique consistent à identifier les paramètres structuraux d'un modèle de connaissance, puis d'extraire le paramètre physique du système à partir des lois de connaissance. Le point essentiel du diagnostic par identification paramétrique est le choix du modèle. De ce choix dépend le type de défaut que l'on pourra détecter sur la machine. En effet pour détecter et localiser un défaut au stator ou au rotor, il faut que ce dysfonctionnement puisse être discriminé au niveau des paramètres physique estimés.

**II.5.2 L'estimation d'état**

La détection de défauts par estimation d'état a surtout été étudiée avec le modèle de PARK. Les techniques de détection de défauts les plus répandues en automatique reposent sur

la génération de résidus à partir d'un modèle de fonctionnement sain. Différentes approches, que l'on peut classer sous le terme générique d'estimation d'état, ont été étudiées et évaluées par plusieurs méthodes :

- Banc d'observateur à entrées inconnues avec découplage non linéaire, sur la base du modèle de Park.
- Observateur d'état à mode glissant.
- Génération de résidus par projection des équations du modèle de Park dans l'espace de parité.

En diagnostic, l'objectif est d'estimer les variables d'état du système à partir d'un modèle de comportement parallèle rebouclé de façon à s'affranchir essentiellement des problèmes d'initialisation des grandeurs d'état. Ces grandeurs estimées sont comparées aux grandeurs mesurées afin de détecter le dysfonctionnement dans le système surveillé.

### **II.5.3 Traitement de signaux**

Pour effectuer le diagnostic d'une installation, les opérateurs de maintenance analysent un certain nombre de symptômes tels que le bruit, la température, les vibrations,... etc.

En s'appuyant sur leur expérience. Ces symptômes ne sont que la manifestation flagrante d'une modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles d'un certain nombre de grandeurs mesurables.

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

#### **✓ Analyse spectrale**

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

#### **✓ Analyse cepstrale**

Le cepstre est une anagramme du mot 'spectre' la raison de ce choix tient à ce qu'on obtient le cepstrum en effectuant une analyse spectrale supplémentaire sur le spectre fréquentiel du signal observé. Le cepstre est plus particulièrement utilisé dans les analyses vibratoires des machines tournantes. Les principales applications concernent la détection des défauts dans les roulements, les turbines ou encore les engrenages. [24]

### ✓ Les méthodes de détection de fréquences connues

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

### ✓ Méthodes temps –fréquence

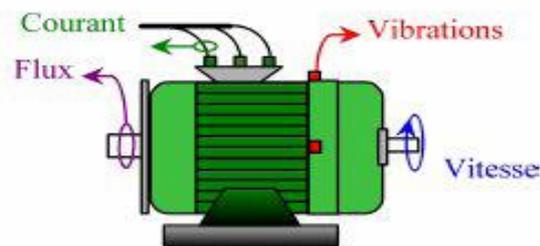
Les méthodes d'analyse temps –fréquence ont été développées pour l'étude des signaux non-stationnaires. Plus généralement elles s'appliquent à des signaux dont le contenu fréquentiel ou les propriétés statistiques évoluent au cours du temps. Pour décrire cette évolution temporelle il faut réaliser une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

### ✓ Méthode temps-échelle

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

## II.6. Paramètres indicateurs de défaut

Parmi les signaux qui contiennent les informations jugées pertinentes par les spécialistes du domaine et considérées comme paramètres indicateurs de défauts on a :



**Figure II.5.** Les mesures utilisées pour la surveillance et le diagnostic des machines asynchrones.

### II.6.1 Le flux magnétique axial de fuite

Les circuits électriques et magnétiques de la machine ne sont jamais parfaits à causes des tolérances et des défauts de fabrication parmi d'autres, et présentent souvent quelques degrés d'asymétrie permettant la génération des flux de fuite dont le contenu spectral est lié directement aux harmoniques contenus dans les courants statoriques et rotoriques. [25]

### II.6.2 Le courant statorique

Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signature Analysis). La MCSA consiste à affecter à chaque défaut une signature spectrale le caractérisant. Dans le

même contexte, il a été démontré que la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère, et notamment, des raies déjà présentes dans le moteur sain (harmoniques d'espace).

### II.6.3 Les vibrations

Le diagnostic par l'analyse vibratoire fait partie des techniques mécaniques qui sont employées pour déceler des défauts au niveau des machines électriques. Une vibration est souvent accompagnée d'un bruit sonore qui peut être élevé même pour des faibles amplitudes de vibration. Le diagnostic des défauts en utilisant l'analyse vibratoire est la méthode la plus connue dans la pratique [25]. Les forces radiales, créées par le champ d'entrefer, provoquent des vibrations dans la machine asynchrone. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique. [3]

Les vibrations de la machine peuvent être captées par des accéléromètres placés sur les paliers selon les directions axiale, verticale et radiale. Les spectres des signaux de vibrations, issus du moteur avec défaut, sont comparés avec ceux de références enregistrées lorsque le moteur était en bon état. Cette méthode permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques puisque la distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer est le produit de la Fmm et de la perméance (P), la force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor et la perméance dépend de la variation de l'entrefer (à cause des ouvertures des encoches statoriques, rotoriques et l'excentricité). Cependant, le coût des capteurs de vibration qui est relativement élevé, ainsi que les difficultés rencontrées dans la connexion de ces capteurs (problème d'accessibilité) représentent les limites et les inconvénients de cette méthode. [3]

### II.6.4 Le couple

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 de ce signal, donne des informations pertinentes sur l'état du moteur. Cependant, la nécessité d'un équipement assez coûteux pour l'acquisition de cette grandeur représente l'inconvénient majeur de cette méthode [3].

## II.6.5 La température

Grâce à des dispositifs à infrarouge, on perçoit les zones chaudes dont les températures dépassent les températures limites prédéterminées. Pour ce faire, un balayage systématique de l'ensemble de l'installation électrique, et notamment du moteur asynchrone, est effectué. Les systèmes examinés étant en fonctionnement, les éléments qui composent l'installation électrique sont en charge normale. En fait, ils vont nous apparaître, sur l'image infrarouge plus ou moins rayonnant suivant leur rôle, leur conception, leur charge et leur matériau. L'opérateur fait la part des choses entre les températures normales de fonctionnement et les anomalies. [25]

## II.7 Signatures spectrales pour révéler le défaut

### II.7.1 Les harmoniques de la fmm dans la machine asynchrone

Dans l'étude de la machine asynchrone, des hypothèses simplificatrices sont supposées, par exemple : la tension d'alimentation est purement sinusoïdale, l'entrefer est lisse, la perméabilité du fer est infinie et la FMM (ou bien l'induction B) dans l'entrefer est sinusoïdale...etc. Ces hypothèses simplificatrices sont acceptées pour étudier le principe de fonctionnement de la MAS, cependant, elles ne sont pas applicables pour les problèmes de diagnostic où se trouve une dissymétrie.

En réalité, l'induction magnétique dans l'entrefer n'est pas sinusoïdale, elle est fonction de différents paramètres, tel que les composantes fréquentielles apparaissent dans les tensions d'alimentation ces composantes dites harmoniques de temps et la disposition du bobinage statorique et de la structure de la cage rotorique dans le cas des moteurs à cage. A cause de cette structure, Il a été démontré qu'en plus de l'harmonique fondamental, apparaissent dans le spectre du courant statorique d'autres harmoniques dites harmoniques d'espace (harmoniques d'encoche rotoriques) ayant pour fréquences [25] :

$$f_{he} = \left[ \frac{kN_b}{p} (1 - g) \pm n_{\omega s} \right] \cdot fs \quad (\text{II.1})$$

Avec  $fs$  la fréquence de tension d'alimentation, ( $n_{\omega s} = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$ ),  $p$  le nombre de paires de pôles,  $N_b$  le nombre de barres rotoriques,  $n_{\omega s}$  l'ordre des harmoniques de temps de la tension, et  $k$  un entier positif. Pour  $k=1$  et  $n_{\omega s}=1$  on définit ce qui sont appelés 'harmoniques d'encoche principales' (PSH).

### II.7.2 Les défauts statoriques

Pour déceler les défauts de court-circuit, plusieurs approches ont été mises en œuvre, à savoir l'utilisation d'une bobine concentrique placée autour de l'arbre de la machine afin de capter puis analyser le flux axial de la machine. Ce type de défauts entraîne l'apparition d'une série d'harmoniques dans le spectre du flux axial donnée par [25,26] :

$$f_{st} = f_s \cdot \left[ k + \frac{n(1 \mp g)}{p} \right] \quad (\text{II.2})$$

Avec  $k=1,3$  et  $n=1, 2,3, \dots (2p-1)$ .

Le diagnostic des courts-circuits statoriques peut être effectué via la MCSA, et est basé sur la détection des composantes fréquentielles données par l'expression (II.2), du fait que cette onde de flux tournant sera l'origine des composantes de courant équivalentes dans l'enroulement statorique [25,26].

Les harmoniques 150Hz, 250Hz...apparaissent en cas de court-circuit entre spires, mais sont souvent présents à cause de la saturation et de n'importe quel défaut susceptible d'entraîner un déséquilibre d'impédance, tel que le déséquilibre de tension. Aussi, il a été démontré que les harmoniques d'encoches rotoriques et de saturation subissent des variations en cas de défauts statoriques [25].

### II.7.3 Défaut de court-circuit :

La signature fréquentielle de ce défaut se manifeste par l'apparition d'harmonique aux fréquences  $f=n.f_s$  avec  $n = \{1, 2,3, \dots\}$  et  $f_s$  la fréquence d'alimentation.

- ✓ La variation des paramètres se fait comme suit :
- ✓ La résistance statorique augmente.
- ✓ La résistance rotorique diminue.
- ✓ L'inductance rotorique diminue.
- ✓ L'inductance de magnétisation diminue.

### II.7.4 Les défauts des barres rotoriques

Un défaut dans le rotor va engendrer une sorte d'asymétrie qui, dans le cas d'une alimentation par un système de tensions triphasées symétrique, va être à l'origine d'un champ magnétique inverse de fréquence  $-gfs$  dans le circuit rotorique. Cela va engendrer des courants circulant dans le circuit statorique à une fréquence de  $(1-2g)f_s$ . Une autre composante apparaît aussi dans le spectre du courant statorique à une fréquence de

$(1 + 2g)fs$ . Cette composante est due aux fluctuations de la vitesse provoquées par les oscillations du couple. Il a été démontré qu'un processus répétitif donne naissance à une série d'harmoniques dont les fréquences sont données par [26] :

$$f_b = (1 \pm 2kg)f_s \quad (\text{II.3})$$

Avec  $k=1, 2, 3, \dots$

D'autres composantes spectrales peuvent apparaître dans le spectre du courant statorique à des fréquences données par l'expression suivante :

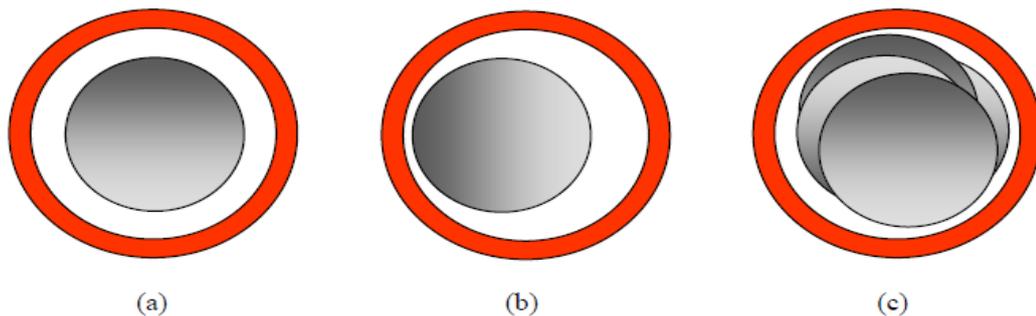
$$f_b = \left[ \frac{k}{p/2} (1 - g) \pm g \right] \cdot f_s \quad (\text{II.4})$$

Avec  $\frac{k}{p/2} = 1, 3, 5, 7, \dots$

Les défauts de cassure de barres génèrent également dans les signaux du couple et de vitesse des composantes de fréquences  $2gf_s$  et  $4gf_s \dots$  [26].

### II.7.5 Les défauts d'excentricité

L'excentricité se répartit en deux catégories : statique et dynamique (voir la Figure II.6). L'excentricité statique se distingue par le fait que le centre du rotor n'est pas égal à celui du stator. L'excentricité dynamique est caractérisée par le fait que le centre du rotor tourne autour du centre du stator [27].



**Figure II.6.** Types d'excentricité: (a) rotor concentré; (b) excentricité statique;

(c) excentricité dynamique.

Même à l'état sain, la machine présente toujours un certain degré d'excentricité statique résiduelle dû aux inévitables erreurs de fabrication [25]. La présence de l'excentricité se manifeste par la création d'harmoniques dans le spectre du courant à des fréquences  $f_{ecc}$  données par :

$$f_{ecc} = \left[ \left( \frac{kN_b + n_d}{p} \right) (1 - g) \pm n_{\omega_s} \right] \cdot f_s \quad (II.5)$$

Avec  $k$  un entier et  $n_{\omega_s} = 1, 2, 3, \dots$  l'ordre de l'excentricité  $n_d$  est égal à 0 pour l'excentricité statique, et 1, 2, 3, ... pour l'excentricité dynamique.

Une autre série d'harmoniques liés à la coexistence des deux types d'excentricité en même temps (excentricité mixte), apparaît de part et d'autre de la fondamentale à des fréquences données par [25, 26] :

$$f_{mix} = |f_s \pm kf_r| \quad (II.6)$$

Tel que  $k$  est un entier positif. Il n'est pas besoin avec cette expression de connaître les paramètres de la machine tel que  $N_b$ , et c'est ce qui la rend parfois avantageuse.

Les défauts d'excentricité peuvent également être décelés par une analyse vibratoire, sachant que des composantes de hautes fréquences de vibration générées par l'excentricité sont données par une formule similaire à (II.5).

### II.7.6 Les défauts de roulements

Parce que les éléments roulants du roulement supportent le rotor, quelque soient les défauts dans les roulements, ils vont produire des mouvements radiaux entre le rotor et le stator dans la machine. Par conséquent, des variations d'entrefer génèrent dans le courant statorique des raies spectrales de fréquences [25, 26] :

$$f_{roul} = |f_s - kf_v| \quad (II.7)$$

Avec  $k=1, 2, \dots$  et  $f_v$  est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations, soit  $f_{bille}$ ,  $f_{b.int}$  ou  $f_{b.ext}$  (figure II.7).

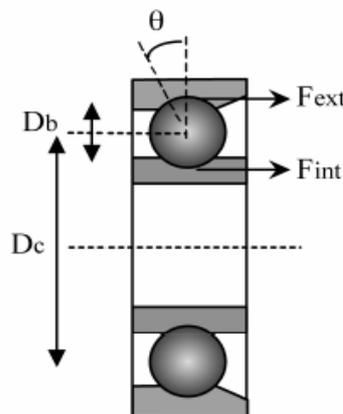


Figure I.7. Dimension du roulement à billes.

- Défaut au niveau d'une bille :

$$f_{bille} = \frac{Dc}{Db} f_r \left[ 1 - \left( \frac{Db}{Dc} \cos \theta \right)^2 \right] \quad (\text{II.8})$$

- Défaut sur la bague intérieure :

$$f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_r \left[ 1 + \frac{Db}{Dc} \cos \theta \right] \quad (\text{II.9})$$

- Défaut sur la bague extérieure :

$$f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_r \left[ 1 - \frac{Db}{Dc} \cos \theta \right] \quad (\text{II.10})$$

Tel que  $n_b$  le nombre d'éléments roulants,  $Db$  le diamètre d'un élément roulant,  $Dc$  la distance entre les centres des billes diamétralement opposées et  $\theta$  l'angle de contact des billes avec les bagues du roulement.

## II.8 Conclusion

Ce chapitre a été, essentiellement dédié à l'état de l'art des méthodes de surveillance et de diagnostic des machines électriques et plus particulièrement la machine asynchrone à cage d'écureuil. Une description d'une manière non exhaustive de la constitution de la machine asynchrone à cage d'écureuil a été présentée, ainsi que les différents types des défauts qui peuvent affecter la machine et leurs origines. En fin, un panorama sur les méthodes internes et externes utilisées dans le diagnostic des défauts de la machine a été présenté. L'étude détaillée des divers défauts affectant le fonctionnement de la machine nécessite l'élaboration de modèle de la machine en défaut, ce qui fera l'objet du chapitre suivant.

### **III.1 Introduction**

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

Dans notre travail, la détection des défauts dans la machine sera effectuée à travers la technique d'analyse des signatures du courant statorique "Motor Current Signature Analysis" (MCSA), ainsi que la technique d'analyse spectrale de la densité du flux magnétique dans l'entrefer "Flux Signature Analysis" (FSA). Selon Joksimovic [28-29] la technique d'analyse spectrale du courant statorique ou bien d'un autre signal dans la machine à diagnostiquée nécessite une connaissance précoce très forte et sûre du contenu spectrale de ces signaux à l'état sain, d'ailleurs cette technique par principe compare le contenu spectrale du signal choisi à l'état sain avec le contenu spectrale du signal à l'état défaillant.

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

### **III.2. Méthodes de modélisation de la machine asynchrone**

A ce jour, les modèles qui décrivent le fonctionnement de la machine asynchrone à cage d'écureuil peuvent être décomposés en deux parties bien distinctes :

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

En ce qui concerne les modèles physiques, ce sont les lois régissant l'électromagnétisme qui sont utilisées pour décrire le fonctionnement de la machine asynchrone. Ces modèles sont divers et peuvent varier en complexité et/ou en précision selon la méthode de modélisation utilisée [30]. Nous ne les citerons pas tous mais nous pouvons énoncer les plus populaires dont ceux basés sur :

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

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

### III.2.1. Méthode des réseaux de perméance

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

### **III.2.2 Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés**

Les inductances propres et mutuelles entre le stator et le rotor de la machine prennent une place importante dans cette méthode de modélisation car elles contiennent la signature des différents phénomènes pouvant apparaître au sein de la machine asynchrone. Une modélisation précise de ces inductances mènera à un apport d'informations supplémentaires sur les signaux tels que le courant statorique ou encore la vitesse rotorique. Cette approche offre un bon compromis en termes de précision du modèle et de temps de calcul. De plus, ce type de modélisation permet de prendre en compte un certain nombre de défauts d'origine électromagnétique tels que les défauts de court-circuit entre spires statoriques, les défauts de type rupture de barre rotorique et/ou de portion d'anneau de court-circuit. Nous pouvons aussi intégrer à ce type de modèle les défauts d'excentricité statique et dynamique.

### **III.2.3 Méthode des éléments finis**

La méthode des éléments finis est une approche qui requiert un temps de calcul important. Le circuit magnétique de la machine est découpé en plusieurs éléments de dimension faible pour permettre de considérer le matériau magnétique linéaire sur les surfaces correspondantes. L'utilisation des équations de Maxwell, à partir des formes locales, permet de résoudre le problème. La résolution analytique correspondante est complexe et ne permet de traiter le phénomène de saturation que de façon approchée [31]. De nombreux logiciels ont vu le jour pour permettre d'aborder cette approche difficile. Nous pouvons citer Flux 2D, Flux 3D ou encore Maxwell. Le but principal de ces logiciels est, rappelons le, de déterminer la cartographie du champ magnétique présents dans les machines électriques dans l'objectif d'optimiser le dimensionnement de ces dernières.

## **III.3 Modèle éléments finis de la machine asynchrone**

### **III.3.1 Formulations**

Considérons un certain domaine ( $\Omega$ ) dans lequel un champ  $A$ , scalaire ou vectoriel, est la solution de l'équation aux dérivées partielles suivante [31] :

$$D(A) = F \tag{III.1}$$

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

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

$$L(A) = G \frac{\partial A}{\partial t} + HA \quad (\text{III.2})$$

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

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

$$L(A) = HA \quad (\text{III.3})$$

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

$$L(A) = G \frac{\partial A}{\partial t} \quad (\text{III.4})$$

La solution de l'équation (III.1) compte tenu des conditions aux limites (III.2) peut être obtenue par une méthode de résolution numérique. La résolution numérique basée sur la méthode des éléments finis consiste à associer à celle-là un découpage du domaine  $\Omega$  en sous domaines élémentaire  $\Omega_e$  dans lesquels le champ  $A$  est, habituellement, approximé par une fonction polynomiale. Cela va se traduire par une transformation des équations différentielles en un système d'équations algébriques dont la résolution nous permet de déterminer la distribution du champ  $A$  dans le domaine  $\Omega$ .

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

On les définit comme suit :

- ✓ Les relations de couplage électromagnétique :

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{III.5})$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{III.6})$$

✓ Les relations de la conservation des flux :

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{III.7})$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{III.8})$$

✓ la relation régissant les propriétés des matériaux magnétiques :

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{III.9})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{III.10})$$

✓ La relation de la loi d'Ohm :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{III.11})$$

Où

$\vec{H}$  : Champ magnétique (A/m)

$\vec{E}$  : Champ électrique (V/m)

$\vec{B}$  : Induction magnétique (T)

$\vec{B}_r$  : Induction rémanente des aimants (T)

$\vec{J}$  : Densité de courant totale (A/m<sup>2</sup>)

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

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

### III.3.2 Le modèle employé

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

✓ **Le mode magnétostatique**

Ce mode ne pourra donc être utilisé que pour simuler un instant donné d'un fonctionnement essentiellement à vide (sans courants induits) de la machine car il impose de connaître les valeurs des courants dans les différentes barres du rotor. On s'en servira

essentiellement pour la détermination de l'inductance magnétisante du moteur. Dans ce mode les sources sont indépendantes du temps. Le terme  $\frac{\partial B}{\partial t} = 0$

Par conséquent, les équations du modèle deviennent :

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} \quad (\text{III.12})$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (\text{III.13})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{III.14})$$

La condition (II.9) permet de définir une fonction en vecteur potentiel A telle que:

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A} \quad (\text{III.15})$$

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

Par la substitution de (III.15) et (III.14) dans (III.12) nous obtenons l'équation électromagnétique en magnétostatique, exprimée par le système d'équations suivant :

$$\text{rot } (\text{vrot } \vec{A}) = \vec{J} + \text{rot } (\text{v} \cdot \vec{B}_r) \quad (\text{III.16})$$

Où

$\text{v} = 1/\mu$  : est la rélectivité magnétique.

### ✓ Le mode magnétodynamique

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

$$\text{rot } (\text{vrot } \vec{A}) + j\omega\sigma\vec{A} = \vec{J} \quad (\text{III.17})$$

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

**✓ Le mode magnétique transitoire**

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

$$\text{rot}(\text{vrot}\vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{rot}\vec{B}_r + \sigma \text{grad}V = 0 \quad (\text{III.18})$$

**III.3.3 Le principe de la MEF**

Le principe fondamental de la méthode des éléments finis réside dans le découpage du domaine d'étude en domaines élémentaires de dimension finie. Sur chaque domaine appelé élément fini, Le vecteur potentiel, dans un élément de découpage peut être approchée par des fonctions d'approximations (dites fonctions de formes), dont l'expression varie d'un type à un autre. Ces fonctions d'approximations doivent assurées la continuité du potentiel aux interfaces des éléments. La majorité des formes d'approximations du potentiel dans un élément sont des approximations polynomiales [26].

Pour un élément triangulaire on a :

$$Ae(x, y) = a + bx + cy \quad (\text{III.19})$$

Pour les éléments quadrilatéraux on a:

$$Ae(x, y) = a + bx + cy + dxy \quad (\text{III.20})$$

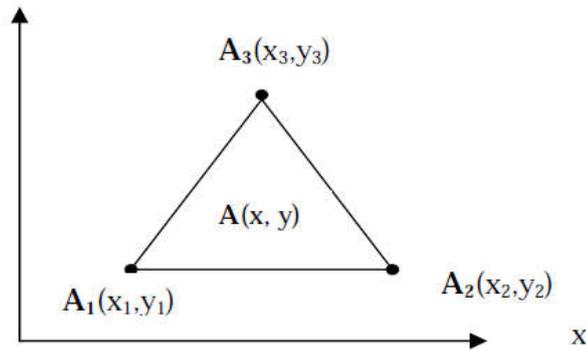
Les constantes  $a$   $b$   $c$  et  $d$  sont à déterminer. Le potentiel  $Ae$  est en générale non nul dans l'élément et nul ailleurs. La valeur approchée du potentiel dans un point du domaine ( $\Omega$ ) de résolution est donnée par :

$$A(x, y) = \sum_{e=1}^{n_e} A_e(x, y) \quad (\text{III.21})$$

$e$  : Numéro d'élément.

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

Le potentiel en tous points d'un élément ainsi que la densité de courant sont parfaitement définis par les valeurs des potentiels de ses trois sommets (Figure. III.1).



**Figure III.1.** Fonction d'interpolation d'un élément

### III.4 Présentation du logiciel FLUX2D

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

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

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

- ✓ **Module Solving Process**

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

### ✓ Module Analysis

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

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

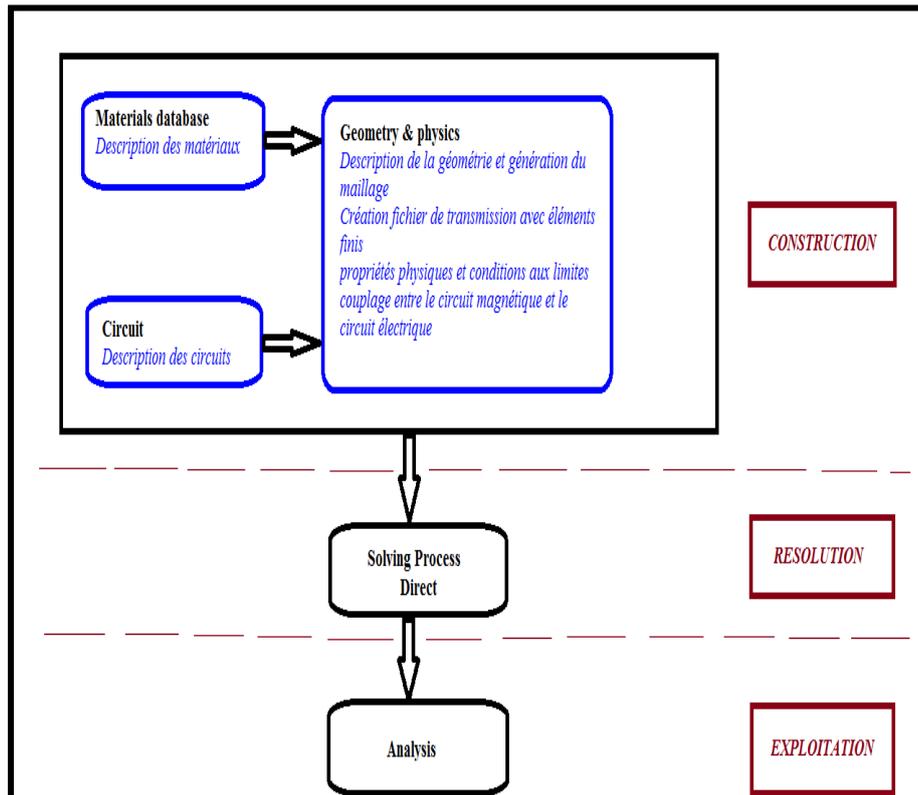


Figure III.2. L'enchaînement des programmes de Flux 2D

### III.5 Construction du modèle de la machine asynchrone

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

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

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

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

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

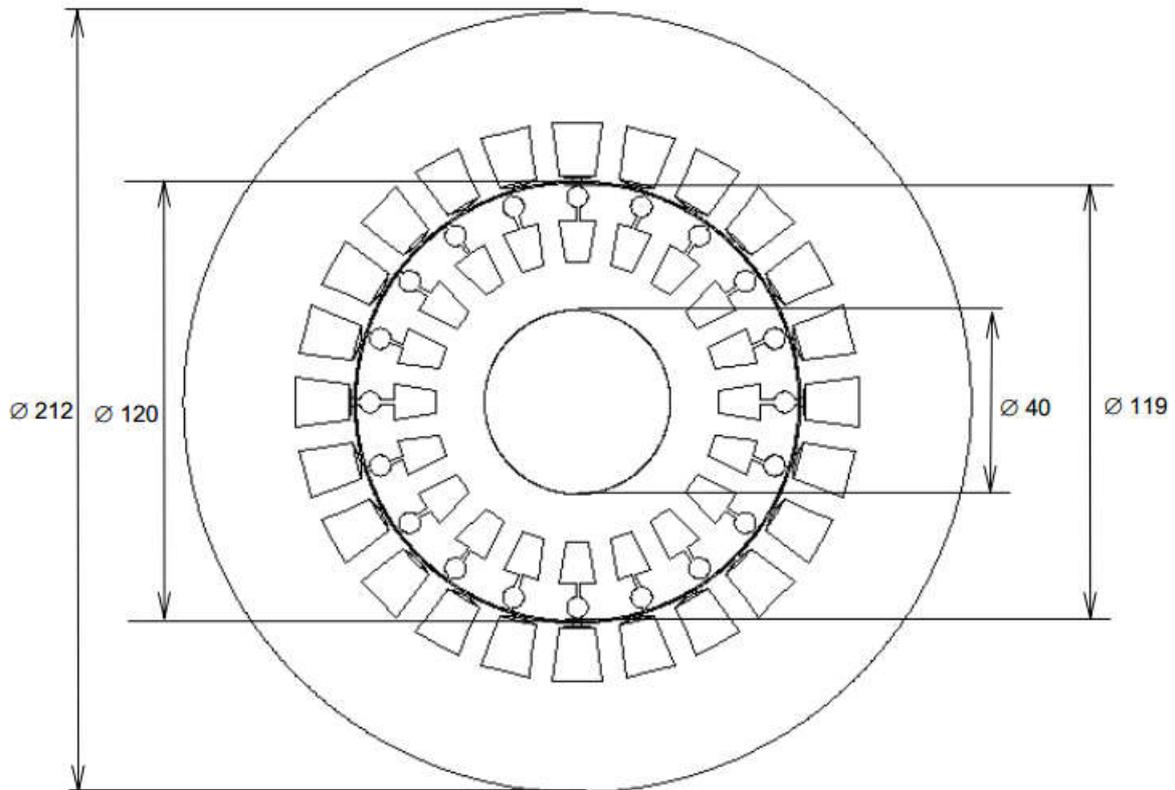
### III.5.1 Les données de la machine étudiée

Les caractéristiques de la machine asynchrone étudiée sont données au tableau III.1.

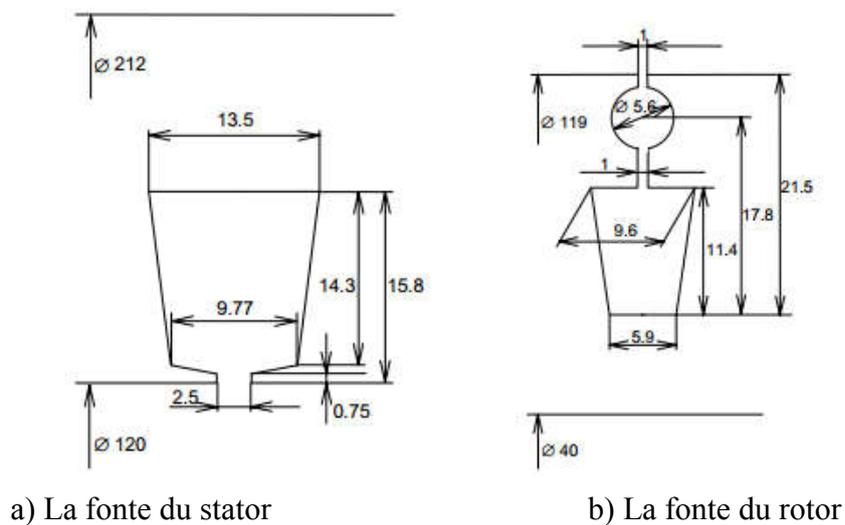
	Paramètres	Valeurs
MACHINE	Puissance	7.5kW
	Courant	8.89 A
	Tension	380V
	Fréquence	50Hz
	Vitesse nominale	2925tr/min
	Nombre de paires de pôles	2
	Longueur du paquet de tôles	125mm
STATOR	Nombre d'encoches	48
	Nombre de spires par phase	208
	Connexion	Y
	Diamètre extérieur	120mm
	Diamètre intérieur	90.4mm
	Résistance par phase	1.54Ω
ROTOR	Nombre d'encoches	20
	Diamètre extérieur	119mm
	Diamètre intérieur	40mm
ENTREFER	Epaisseur	0.5mm

**Tableau III.1.** Les paramètres et son valeurs la machine asynchrone étudiée.

La figure III.3 et III.4 présente la géométrie de la machine étudiée et ses dimensions.



**Figure III.3.** Les dimensions de la machine



a) La fonte du stator

b) La fonte du rotor

**Figure III.4.** Dimensions des fontes

L'enroulement du stator est un enroulement de cuivre à deux couches, Figure 2-4, avec une étape raccourcie de 8/12 et  $w_1 = 208$  tours par phase.

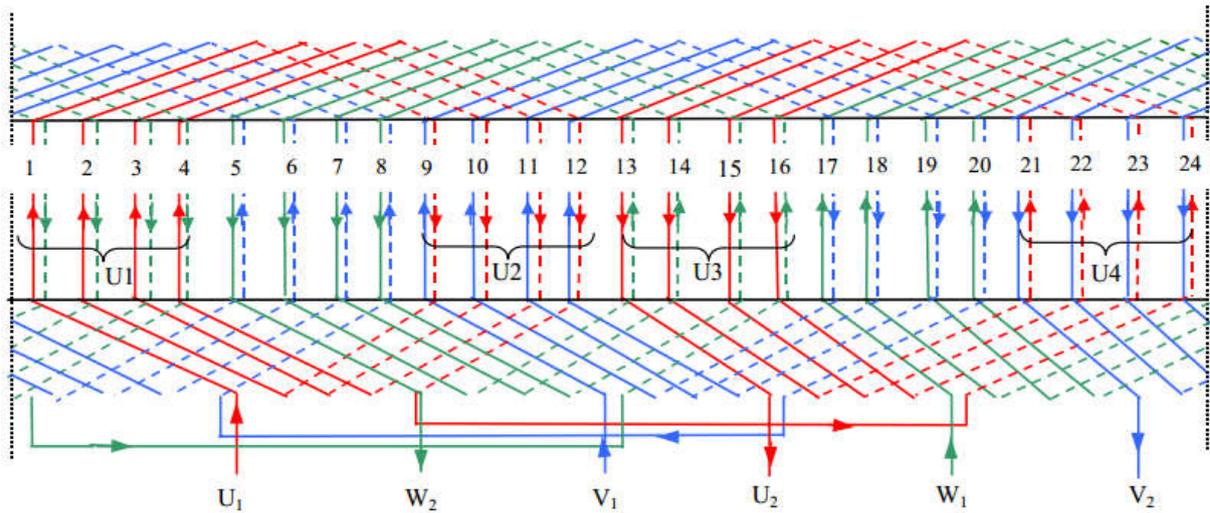


Figure III.5. Bobinage statorique

La figure III.6 présente le circuit magnétique de la machine asynchrone et la répartition de ces trois phases d'alimentation sur les encoches statoriques.

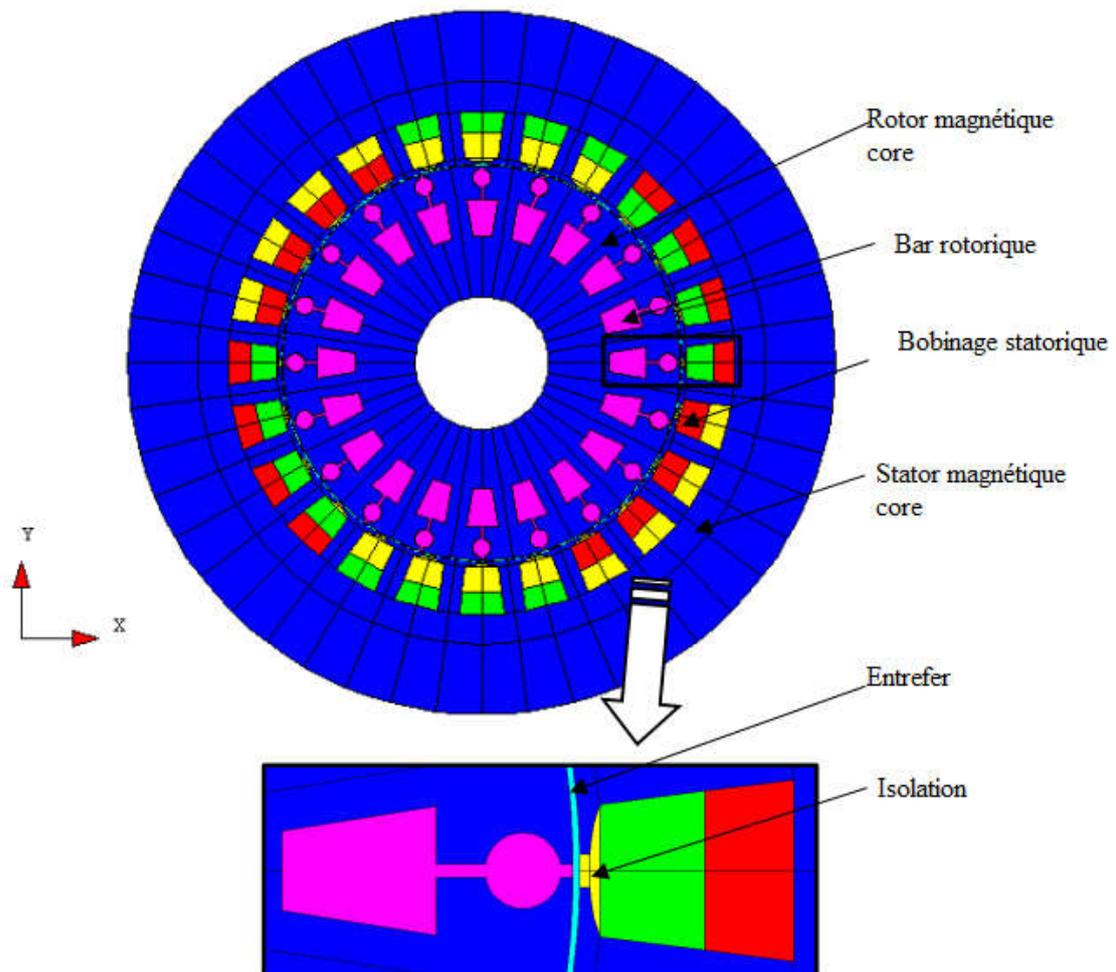


Figure III.6. Circuit magnétique de la MAS

### III.5.2 Procédure de construction du modèle par FLUX2D

Pratiquement, il suffit pour une machine saine de considérer un seul pôle grâce à la symétrie électrique et magnétique de la machine par rapport à son axe de rotation, mais ce n'est pas le cas pour une machine avec défaut où elle perd sa symétrie. Il faut donc réaliser la géométrie complète de la machine pour étudier son comportement avec défaut. [26]

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

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

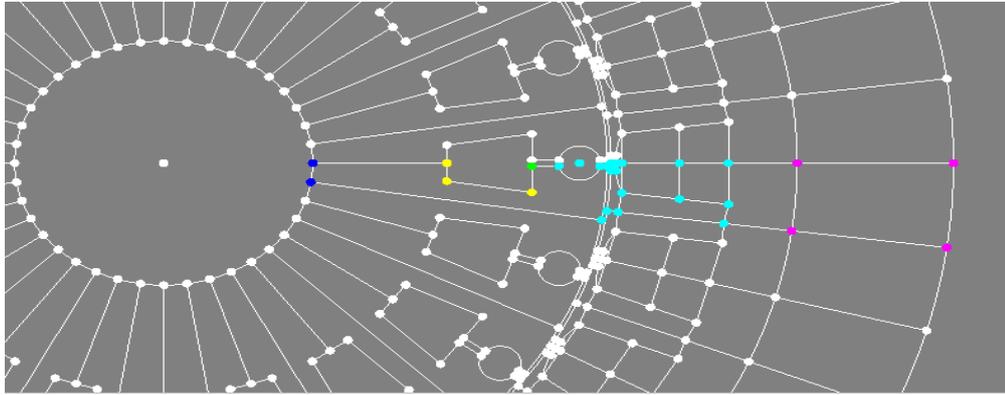
Lorsque on entre les points de l'encoche statorique et de celle rotorique et relie entre eux par des lignes et des arcs, les surfaces des régions sont automatiquement construits par ces lignes. Puis on construit les deux lignes intérieure et extérieure du rotor et celle extérieure de stator.

### III.5.3 Génération du maillage

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

Pour compléter la géométrie facilement on ajoute des transformations qui doublent rapidement les surfaces et les lignes : pour le rotor, la transformation est une rotation autour d'un point, définie par les coordonnées de ce point et l'angle de rotation. Dans notre cas le point est o (0,0), l'angle égal à  $360/20$ . Pour le stator on définit une transformation du même type avec un angle égale à  $360/24$ . On applique la première à la surface qui représente la barre rotorique 19 fois et la deuxième à la surface de l'encoche statorique 23 fois avec le choix de commande **Add**

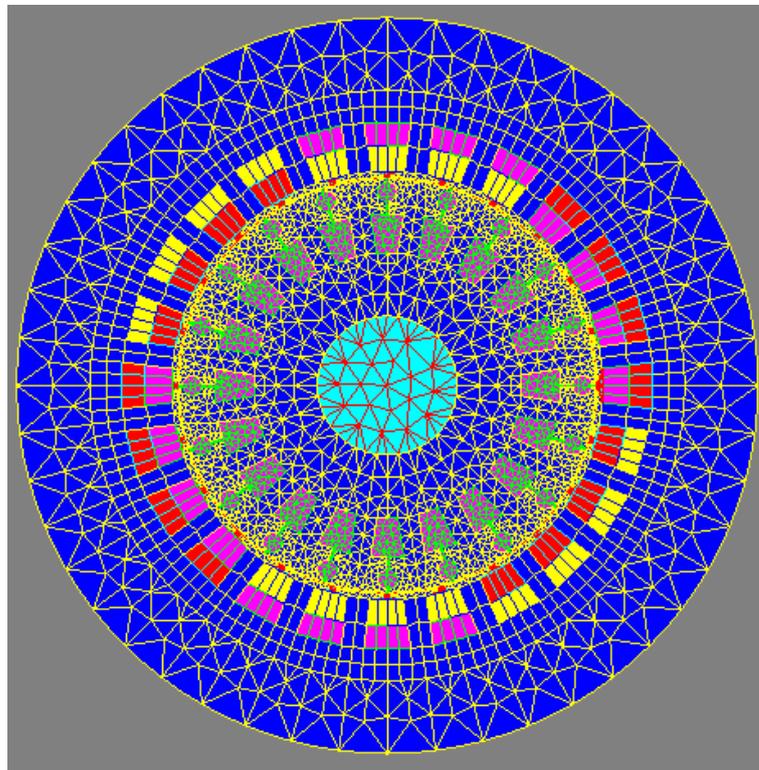
**Faces** and associated **Linked Mesh Generator** pour doubler les surfaces avec la prise en compte de leur maillage. Il reste le diamètre intérieur de stator, pour le compléter on relie entre deux encoches par un arc puis double cet arc 23 fois en appliquant la même transformation de l'encoche statorique. Finalement on choisit la commande **Build Faces** pour créer le reste des surfaces. La figure ci-dessous présente la géométrie avec les points de maillage.



**Figure III.7.** Les points de maillage

Jusqu'à ici le maillage n'est pas effectué, pour mailler la géométrie on choisit la commande **Mesh lines** puis la commande **Mesh faces** et le maillage sera schématisé.

La figure II.7 représente le maillage effectué sur le circuit magnétique de la machine.



**Figure III.8.** Répartition du maillage

Le maillage est plus dense au voisinage de l'entrefer puisque dans cette région se développe l'énergie électromagnétique. Par contre le maillage est plus grossier vers l'arbre et vers l'extérieur de la culasse pour alléger le temps de calcul sans perte sensible d'information. La carcasse externe de la machine étant conductrice et généralement reliée à la terre, lors de nos simulations nous appliquons la condition de Dirichlet sur tout le contour de la machine avec un potentiel vecteur nul.

### III.5.4 Création des matériaux

Pour notre modèle on utilise trois types de matériaux : STEEL\_NLIN (défini comme un matériau ferromagnétique non linéaire), l'Aluminium et l'air.

L'aluminium est défini comme un matériau linéaire par une résistivité et une perméabilité relative constante. Il n'est pas nécessaire d'ajouter d'autres propriétés (propriétés thermiques par exemple) parce qu'ils ne sont pas prises en compte pour notre cas (analyse magnétique).

Le matériau ferromagnétique STEEL\_NLIN est caractérisé par la courbe d'aimantation  $B$  ( $H$ ), qui est non linéaire, pour tenir en compte de la saturation du circuit magnétique.

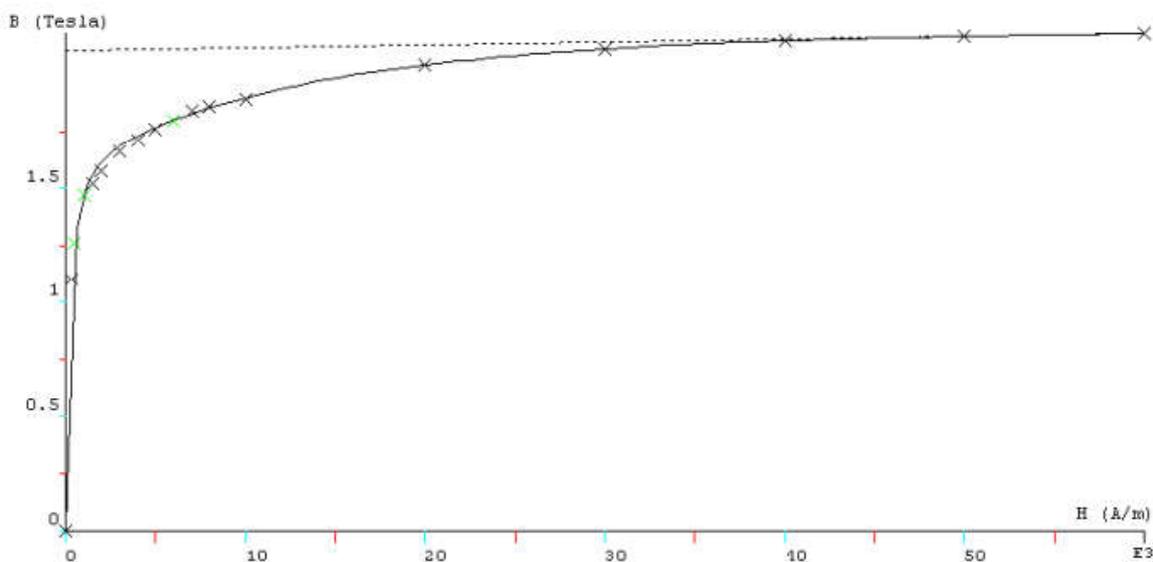


Figure III.9. La courbe d'aimantation  $B$  ( $H$ ) du matériau ferromagnétique

### III.5.5 Le circuit électrique

Pour bien représenter le circuit électrique de la machine il faut tenir compte des effets d'extrémités (inductance, résistance de tête de bobine et d'anneau de court-circuit), figure II.9.

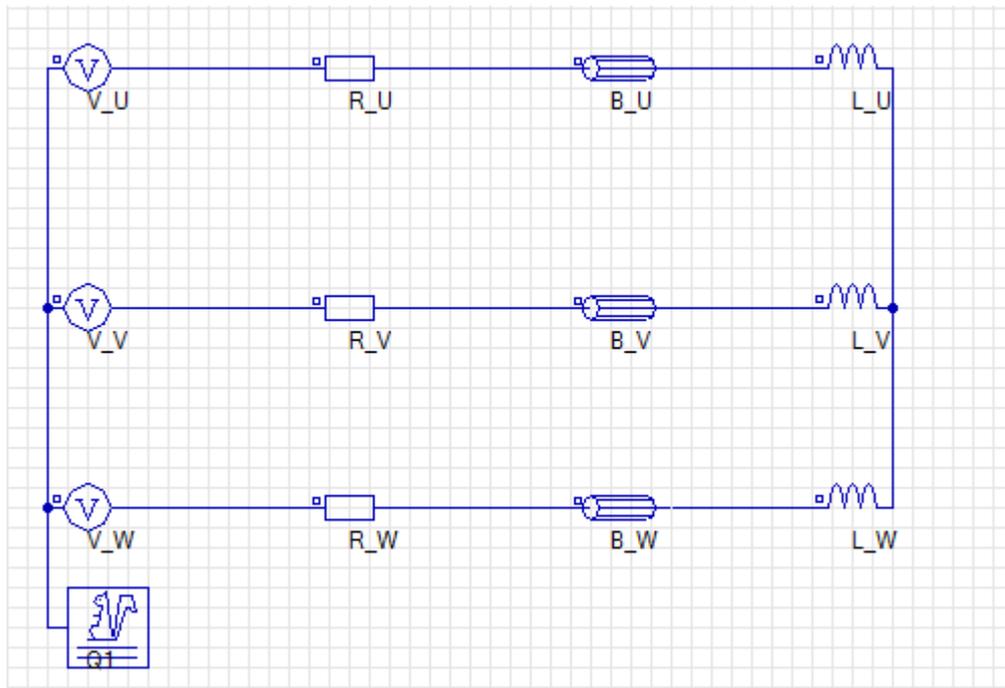


Figure III.10. Le circuit électrique d'alimentation

Q1 : est un macro-circuit (un dispositif du logiciel Flux 2D) utilisé pour modéliser la cage d'écureuil de la machine, c'est un circuit fermé qui contient des barres rotorique, des résistances et des inductances de fuite correspondent aux régions d'inter-barre d'anneaux de court-circuit (arcs entre deux barres adjacentes), figure III.12. V-U , V-V et V-W sont les sources de tension d'alimentation (voir figure II.11). B\_U, B\_V, B\_W représentant le bobinage statorique . R\_U, R\_V, et R\_W sont les résistances de chute de tension dans le réseau. L\_U, L\_V et L\_W sont les Inductances de fuite des têtes de bobines, elles sont calculées analytiquement.

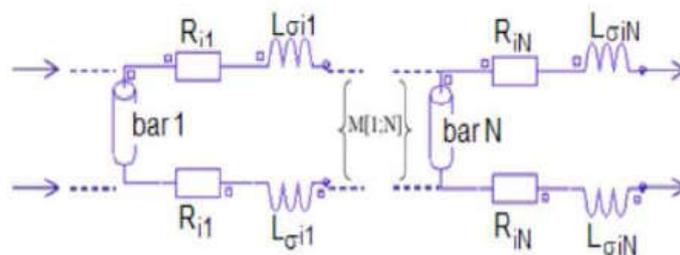
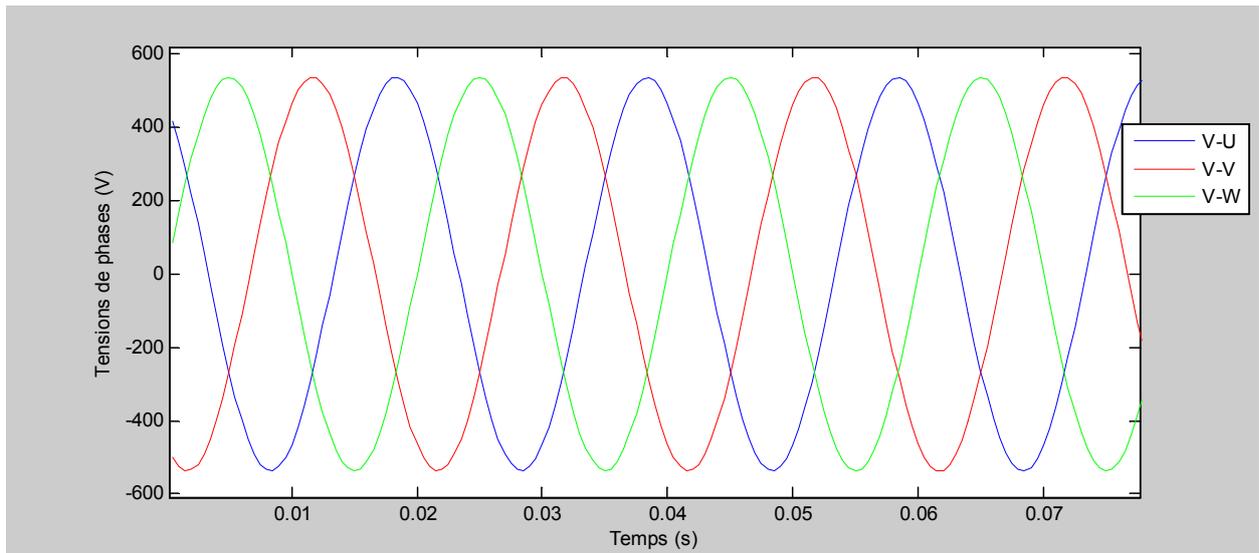


Figure III.11. Circuit équivalent de la cage rotorique



**Figure III.12.** Les tensions d'alimentation  $V_U$ ,  $V_V$  et  $V_W$

### III.5.6 Les propriétés physiques et régions

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

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

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

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

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

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

### III.6 Simulation de la machine asynchrone triphasée à cage à l'état sain

La simulation du modèle de la machine asynchrone à l'état sain est réalisée dans un premier temps pour un démarrage à vide sous une alimentation triphasée nominale et équilibrée. A l'instant suivant seconde, on charge la machine avec un couple nominal de 15 Nm. Les résultats pour ce mode sont illustrés par les figures suivant :

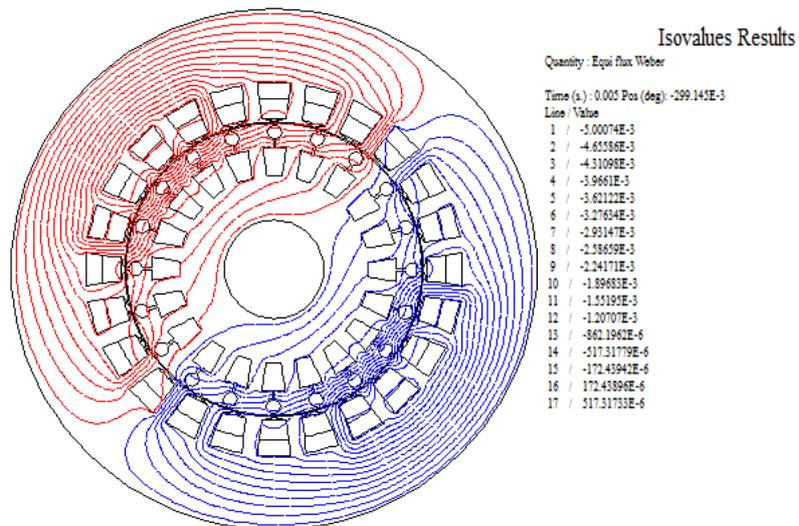


Figure.III.13. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.005 (s).

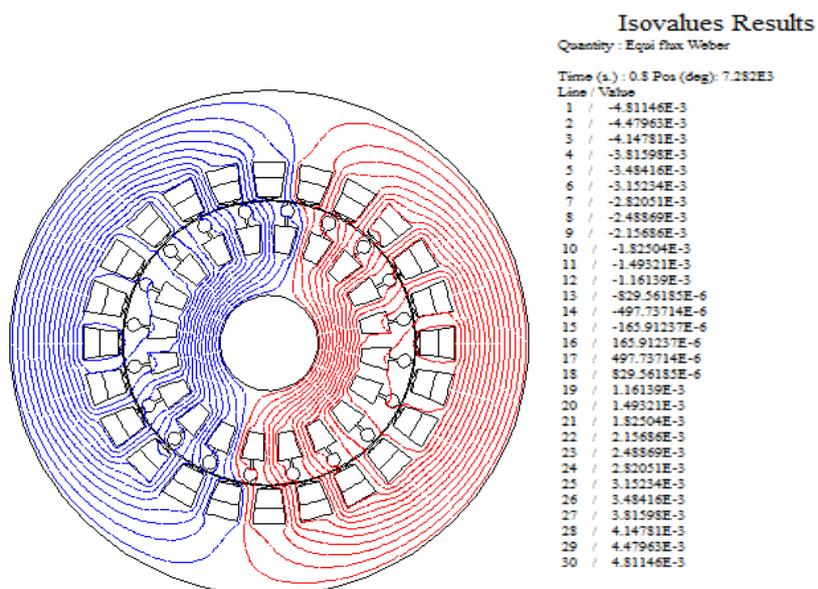


Figure.III.14 Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.8 (s)

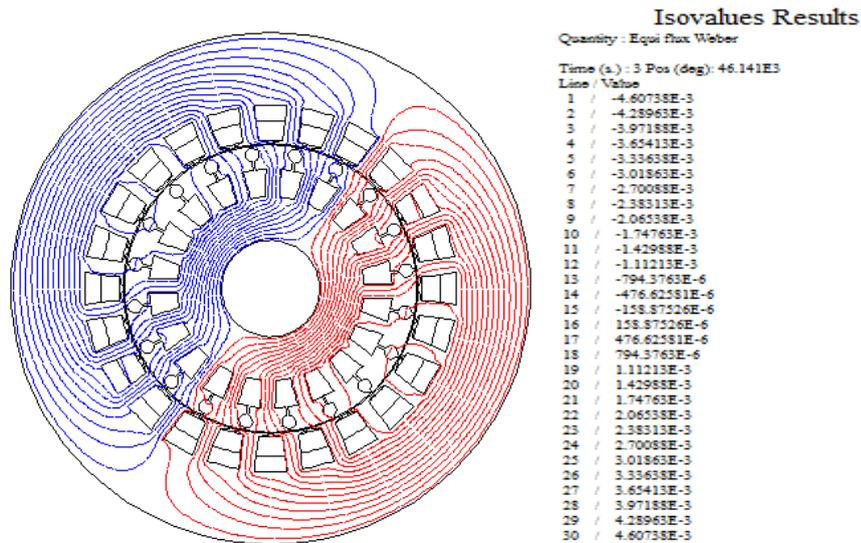


Figure.III.15. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 3 (s)

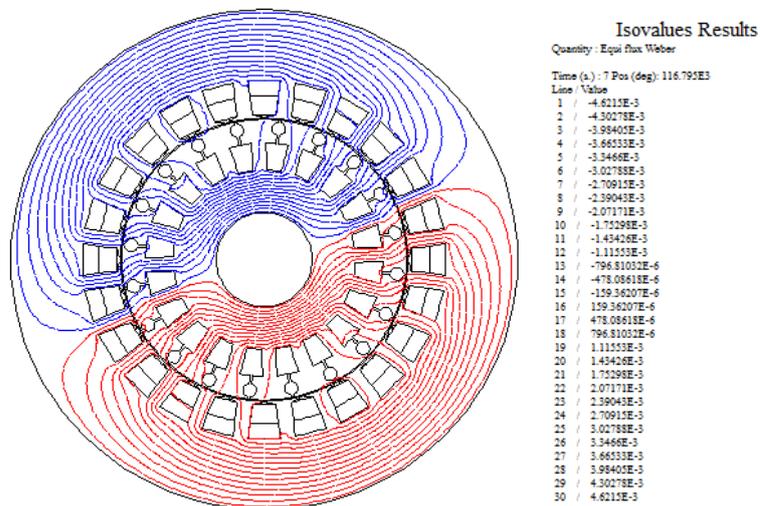


Figure.III.16. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 7 (s)

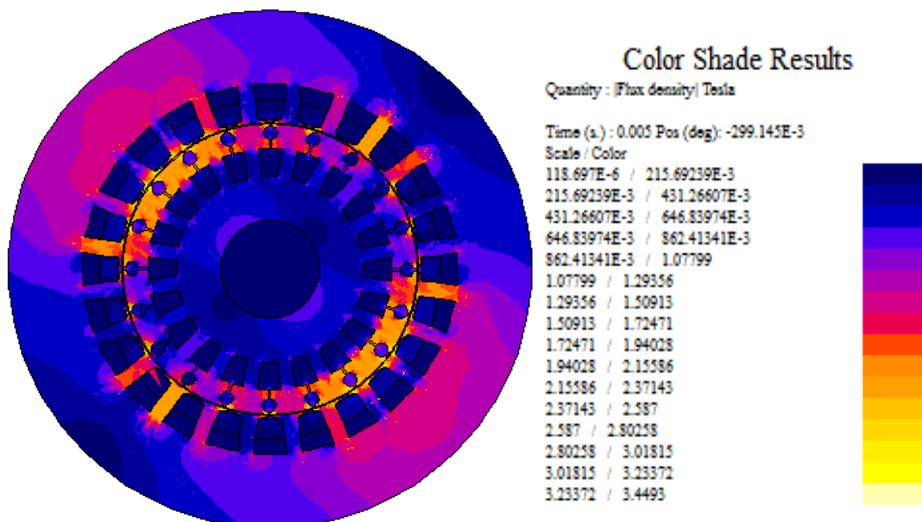


Figure.III.17. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.005(s)

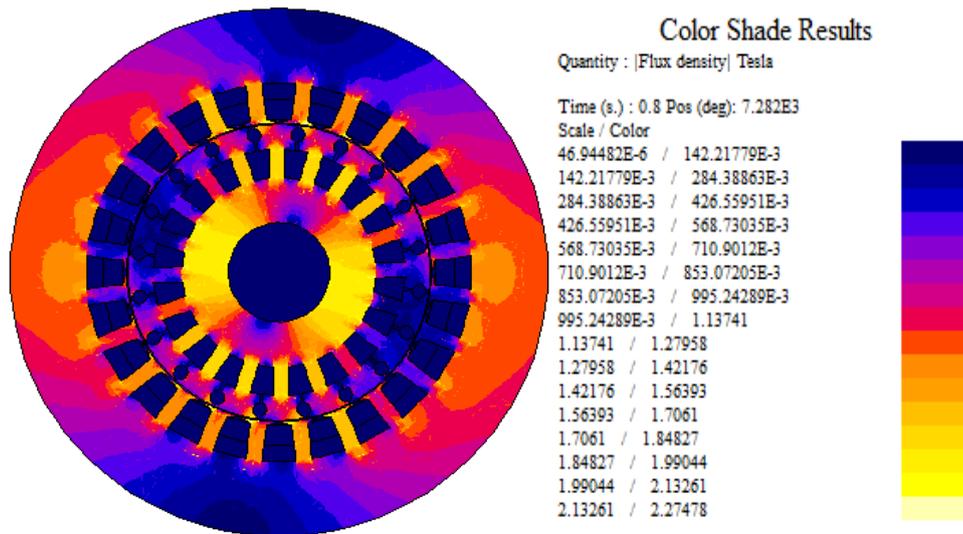


Figure.III.18. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.8(s)

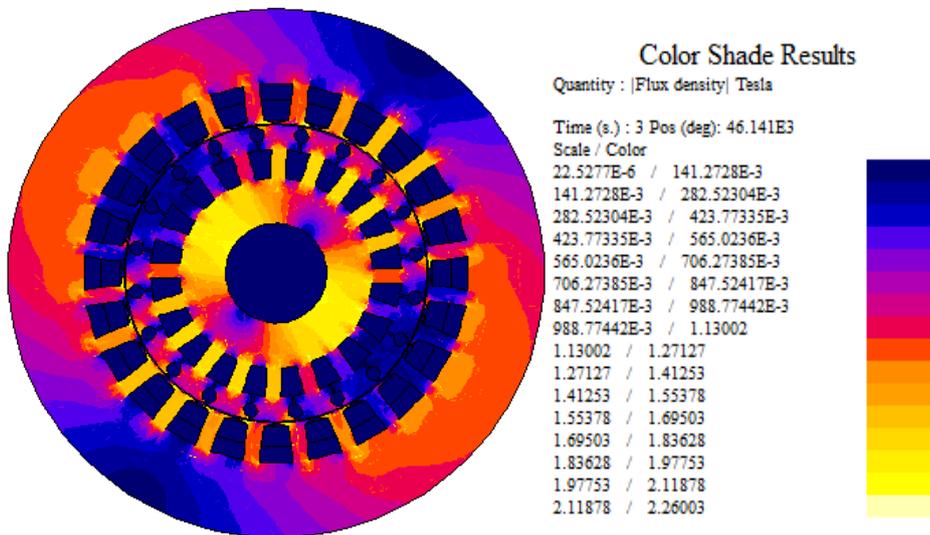


Figure.III.19. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 3(s)

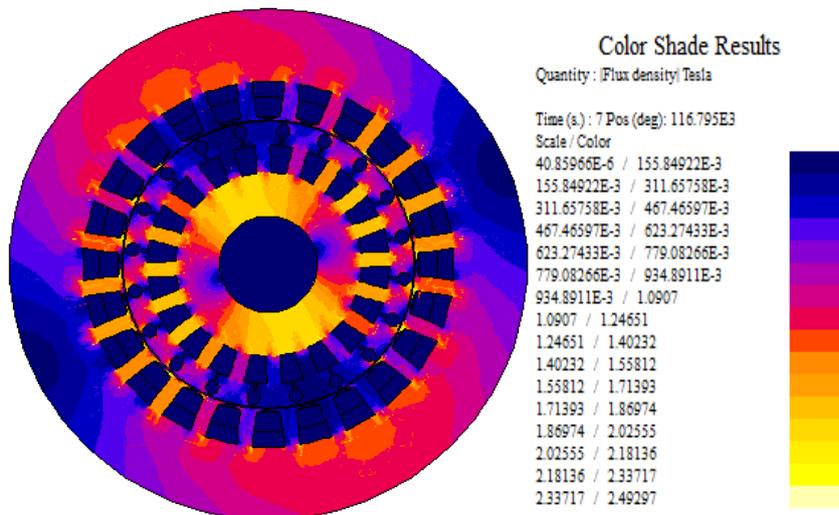


Figure.III.20. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 7(s)

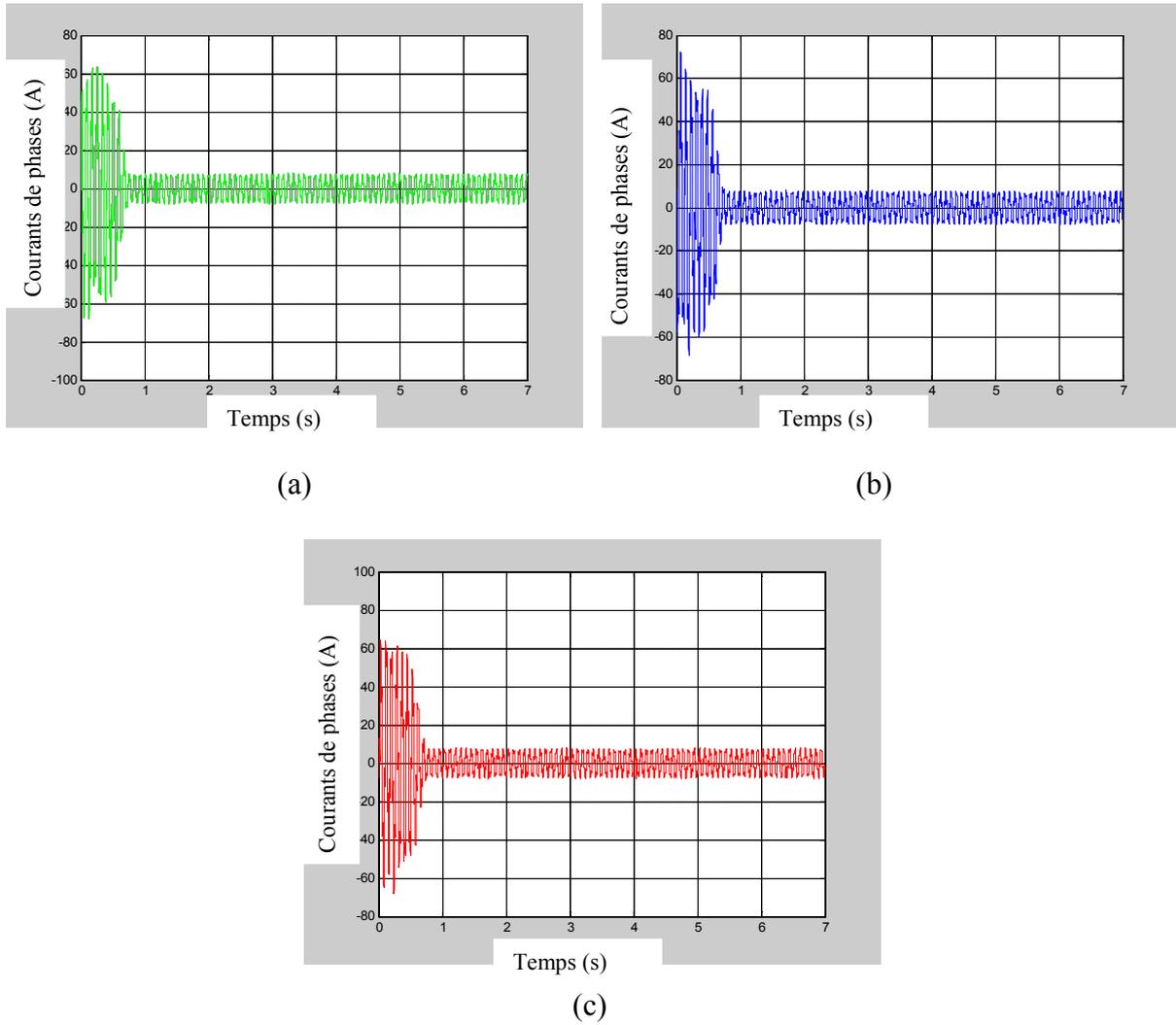


Figure.III.21. Forme d'onde du courant statorique :

(a) phase V\_U, (b) phase V\_V, (c) V\_W

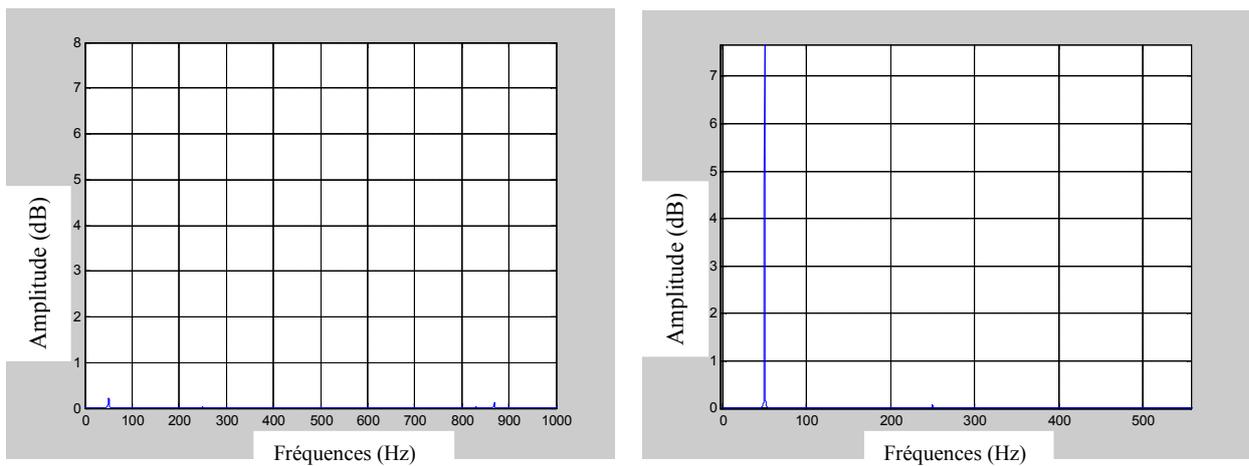


Figure.III.22. Spectre (avec zoom) du courant statorique phase V\_U.

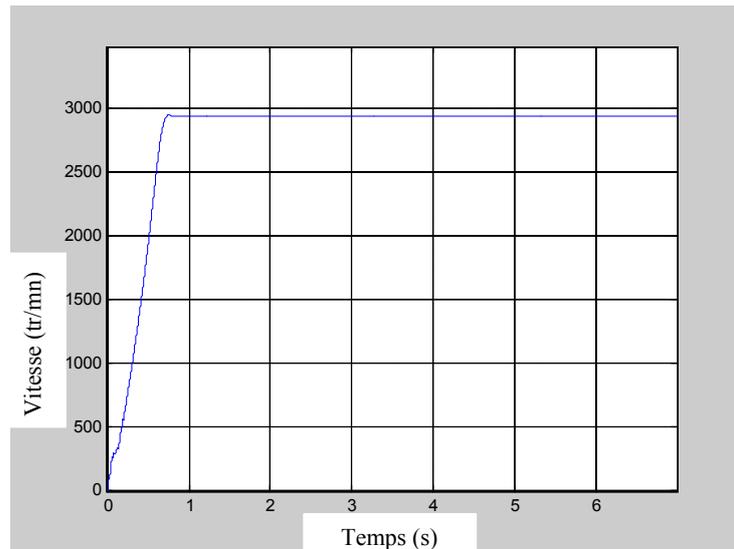


Figure.III.23. Vitesse de rotation de la machine a l'état sain.

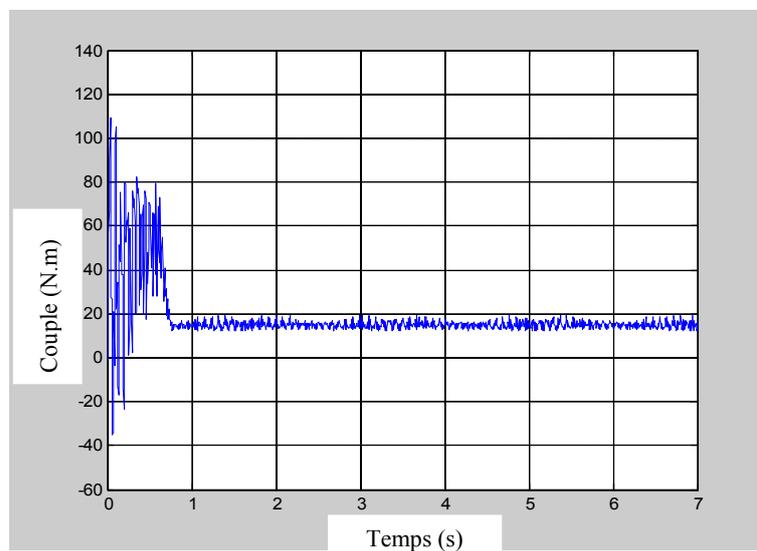


Figure.III.24. Couple électromagnétique de la machine saine en pleine charge.

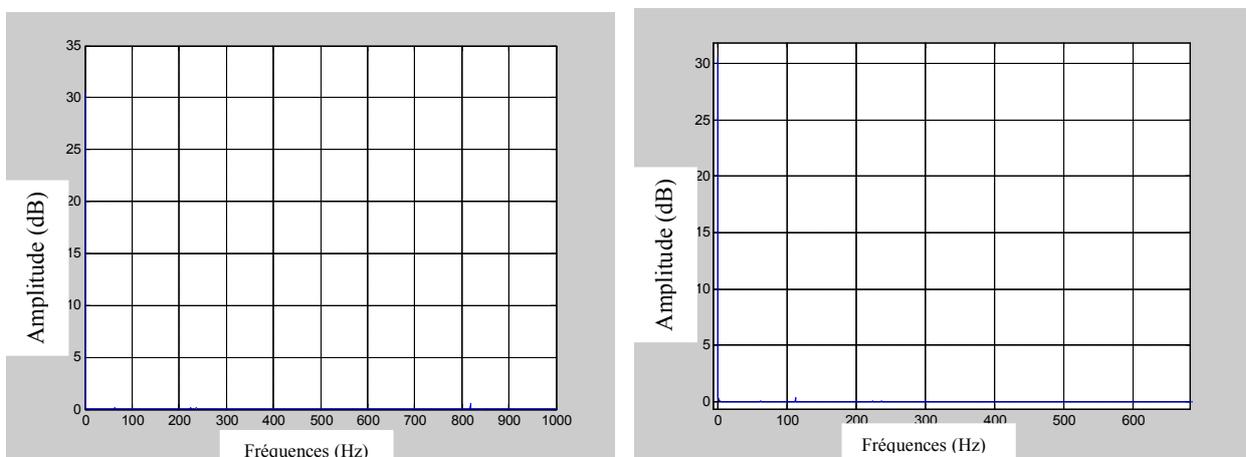


Figure.III.25. Spectre du Couple électromagnétique (avec zoom) de la machine saine en pleine charge.

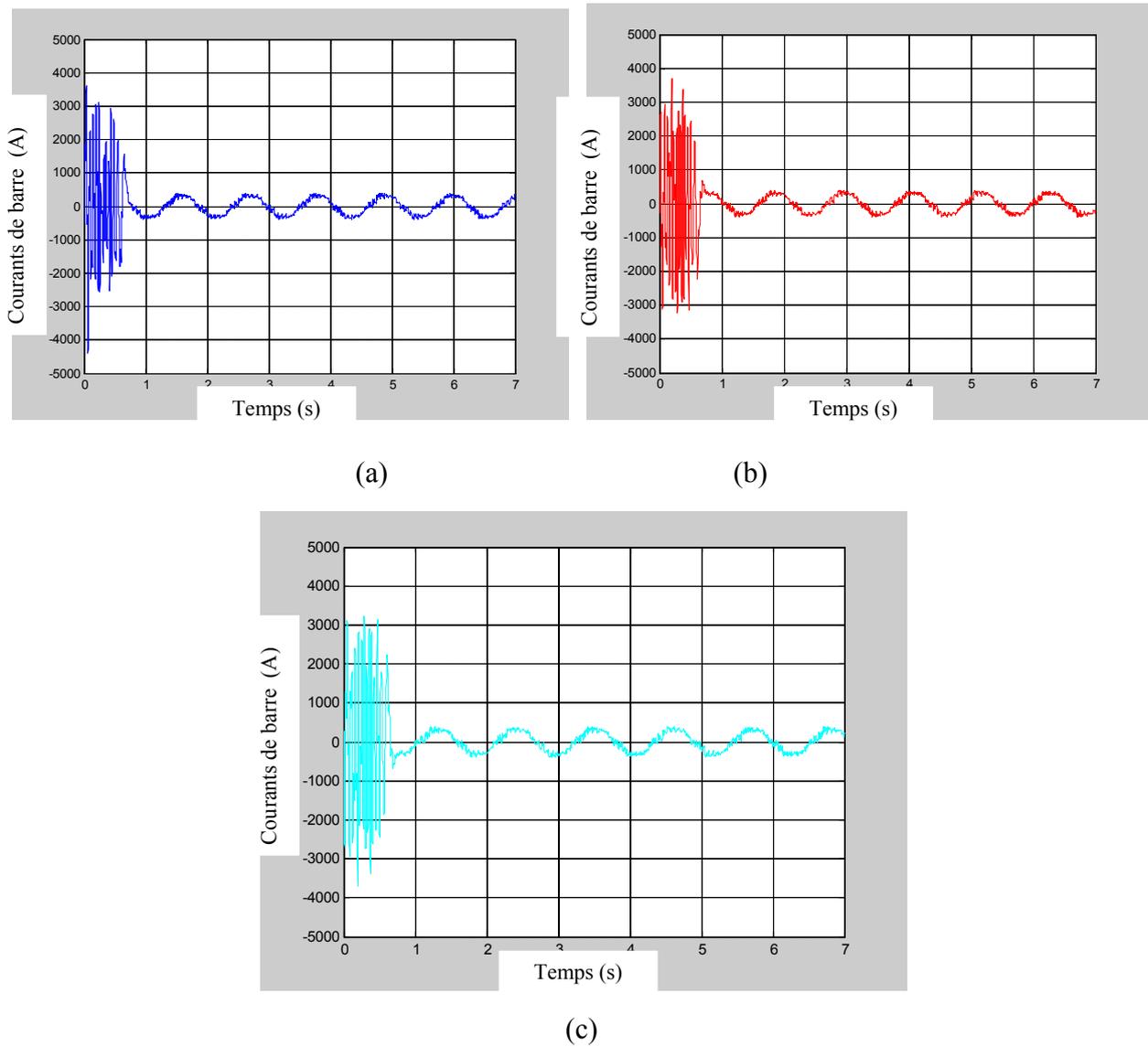


Figure.III.26. Le courant des barres à l'état saine, (a) la barre (5), (b) la barre (10), (c) la barre (20).

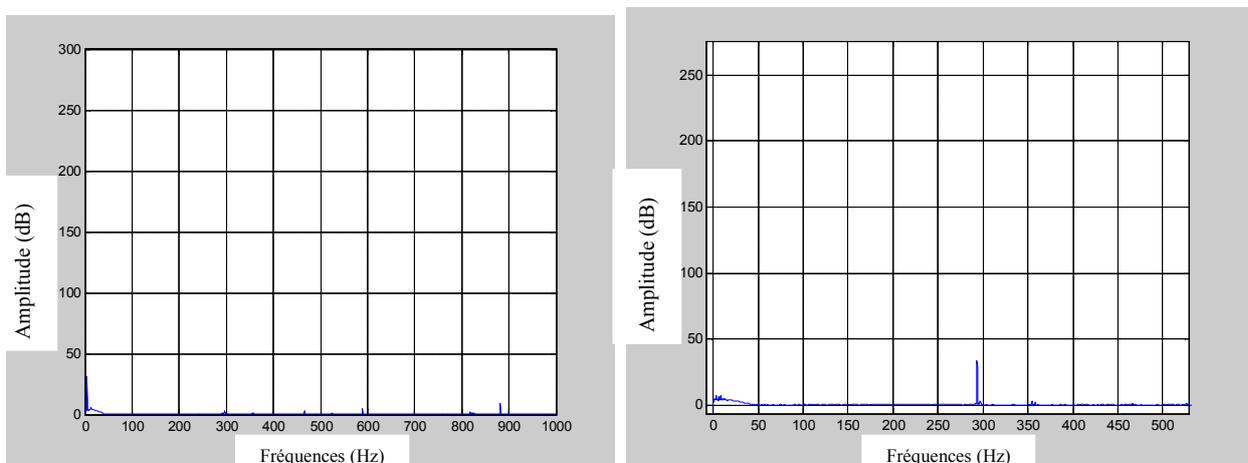
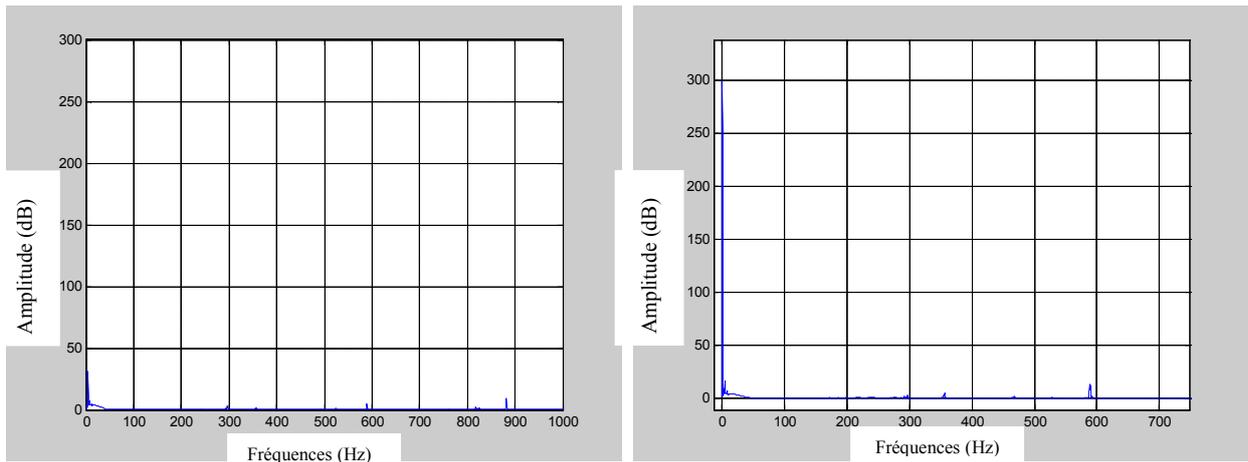
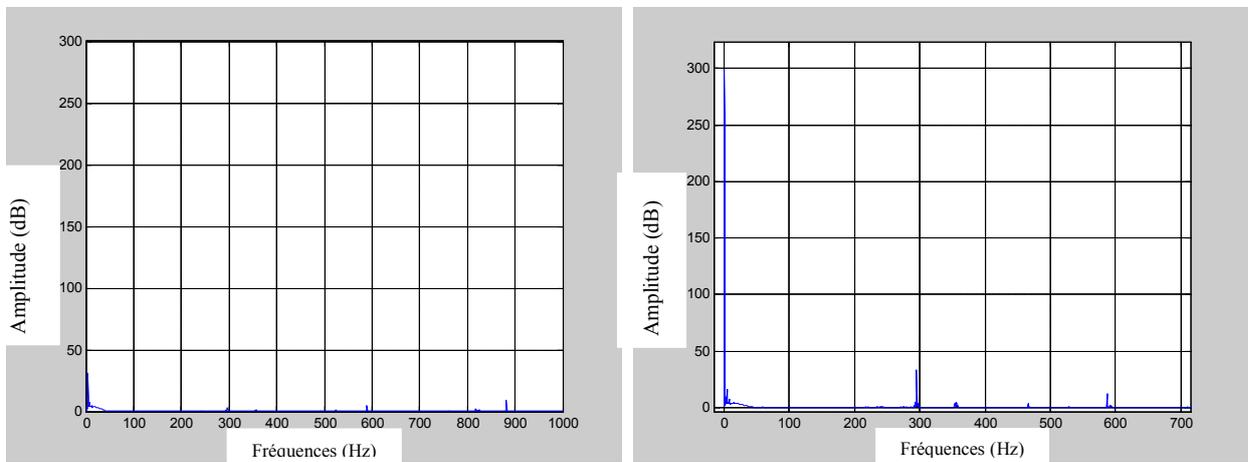


Figure.III.27. Spectre du courant de la barre (05) pour la machine asynchrone en pleine charge (avec zoom).



**Figure.III.28.** Spectre du courant de la barre (10) pour la machine asynchrone en pleine charge (avec zoom).



**Figure.III.29.** Spectre du courant de la barre (20) pour la machine asynchrone en pleine charge (avec zoom).

### III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle numérique de la machine asynchrone, basé sur la méthode des éléments finis. On a commencé par la représentation de la méthode de calcul de champ par les éléments finis en citant les équations qui régissent le champ électromagnétique dans les machines électriques qui sont les équations de Maxwell. Puis on est passé à la description de principe de calcul et du logiciel utilisé.

A la fin de ce chapitre on a donné le résultat de la modélisation et simulation de la modèle de la machine étudiée à l'état sain.

### **IV.1. Introduction**

Nous présentons dans ce chapitre les résultats des simulations du comportement électromagnétique et mécanique d'une machine asynchrone (MASY) dans le cas de la présence de défaut, principalement la rupture de barres rotoriques et dans le cas de la rupture d'une des phases statoriques. Les simulations sont réalisées à partir d'un Logiciel dédié dans son origine à l'étude des machines électrique dans le cas général où la méthode des éléments finis pas à pas dans le temps est adoptée pour résoudre le problème électromagnétique et mécanique régit par des équations aux dérivées partielles caractéristiques aux phénomènes physiques à traiter dans certains cas de nos simulations. L'effet d'encoche et de la saturation magnétique des parties ferromagnétiques de la machine seront tenus en compte. Cette étude a pour but de vérifier l'impact de localisation des défauts de la MASY, principalement un défaut rotorique qui est dû à la cassure d'une des barres soit à l'influence du type de connexion du circuit d'alimentation sur le diagnostic de ce type de défaut. En outre, le défaut de la rupture de barres rotoriques sera combiné avec un déséquilibre de tensions.

### **IV.2 Modélisation de la machine AS à cage avec défaut de cassure de barres.**

Comme il a été déjà mentionné précédemment, selon les études menées sur les différents modes de défaillance dans les machines à cage d'écureuil, que les défauts liés au rotor contribuent à 20% du total des défaillances, notamment le défaut de la rupture de barres rotoriques. Ce défaut sera donc abordé en détail dans ce chapitre. Cependant, ce pourcentage minimise la part de ce défaut dans l'ensemble des atteintes de la machine car, les défauts de cassure de barres ou ceux des portions d'anneau de court-circuit, sont difficiles à diagnostiquer en raison de l'inaccessibilité au rotor. En outre, ce type de défaut peut ne pas présenter de symptômes pendant son stade primaire jusqu'à propager aux barres voisines conduisant à une panne soudaine. Il apparaît donc qu'en détectant le nombre de barres cassées, il est possible d'évaluer l'état de fonctionnement de la machine à induction et d'éviter la situation d'arrêt de se produire. En plus, une détection précise des barres cassées est nécessaire pour prédire avec exactitude les futures performances de la machine asynchrone.

Dans le cadre de notre travail et à partir du logiciel Flux 2D, nous avons pu simuler le comportement de la machine dans le cas d'un défaut rotorique qui peut apparaître dans une MASY. Ce dernier sera simulé par l'augmentation de la résistance rotorique d'une barre où le défaut peut être localisé. Les paramètres physiques et géométriques de chaque partie de la

MASY sont accessible via des fenêtres implémentes sous Flux 2D qui permettent facilement d’agir sur le comportement des matériaux utilisés dans la conception de la machine.

### IV.2.1 Cas de cassure d’une seule barre.

#### IV.2.1.1 Résultats de la simulation de cassure d’une seule barre.

Les résultats des simulations du comportement électromagnétique et mécanique de la MASY sont largement présentés dans le cas de la présence d’un défaut rotoriques. Dans un premier temps nous avons présentés la répartition bidimensionnelle du champ magnétique au sein de la MASY aux instants choisis respectivement au début du régime transitoire ( $t = 0.005$  s), à la fin du régime transitoire ( $t = 0.8$ s) et enfin au régime permanent de la MASY. Aussi nous avons présentés le comportement électrique et mécanique de la MASY dans le cas de la présence d’un défaut rotorique qui est dans ce cas, la rupture d’une seule barre rotorique.

L’outil de simulation utilisé est Flux-2D. Ce dernier possède une base de donné de chaque matériau qui rentrer dans la conception de la machine. Pour pouvoir modélisé le défaut de la machine qui est du à une rupture dune barre rotorique nous avons augmenté légèrement la valeur de la résistance rotorique considéré comme affecté par la rupture.

Selon les résultats des simulations présentés, nous pouvons dire que la présence de la rupture d’une seule barre n’a pas affecté considérablement sur le comportement magnétique, mécanique et électrique de la machine. En effet, selon les résultats présentés, la répartition des lignes de champ magnétique est presque symétrique, cependant l’analyse spectrale des courants statorique montre l’existence de certains harmoniques autour de la fondamentale. Si harmoniques indiquent que le défaut existe.

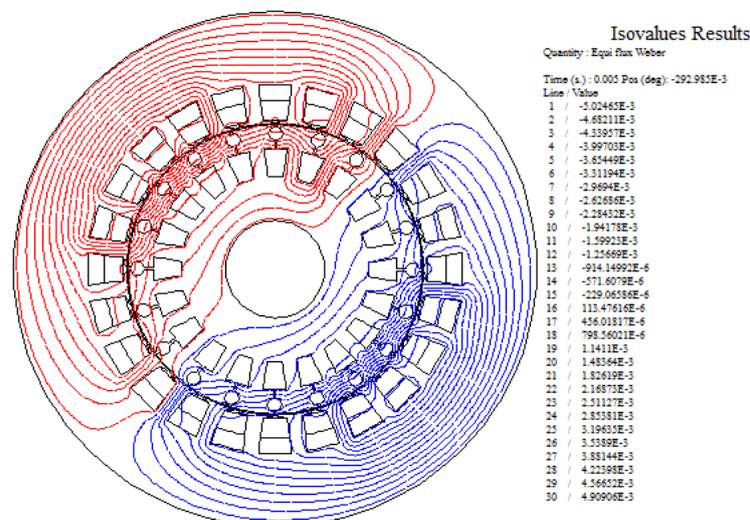


Figure. IV.1. Lignes des flux à l’intérieur et à l’extérieur de la machine à l’instant 0.005 (s).

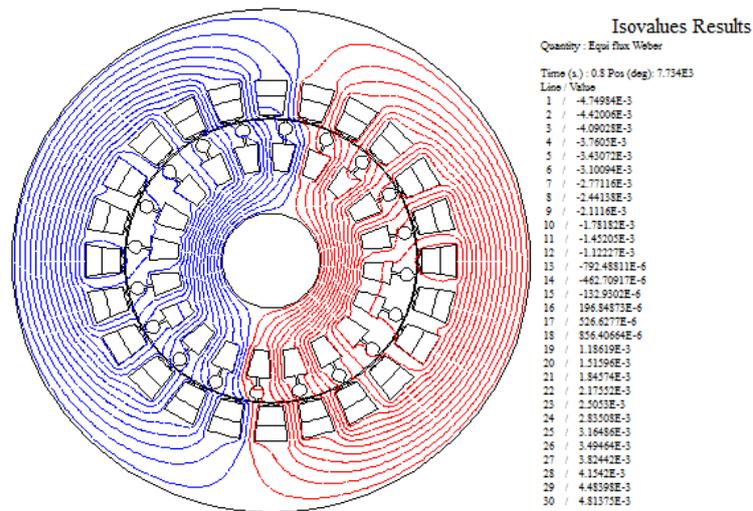


Figure. IV.2. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.8 (s)

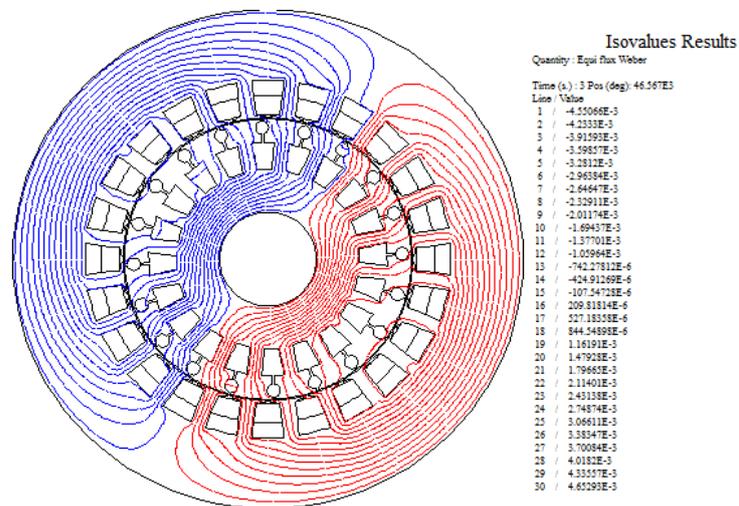


Figure. IV.3. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 3 (s).

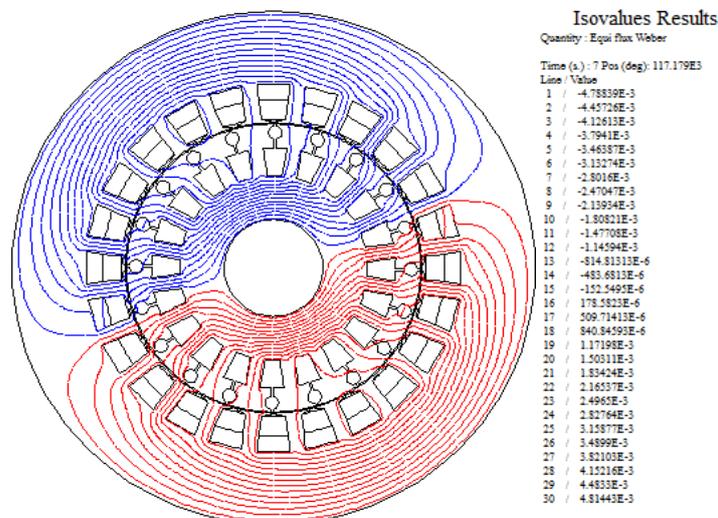


Figure. IV.4. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 7 (s).

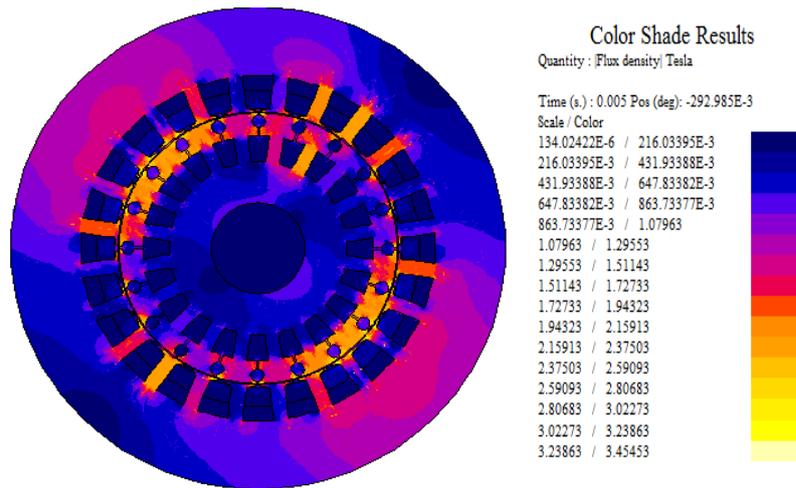


Figure. IV.5. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.005(s)

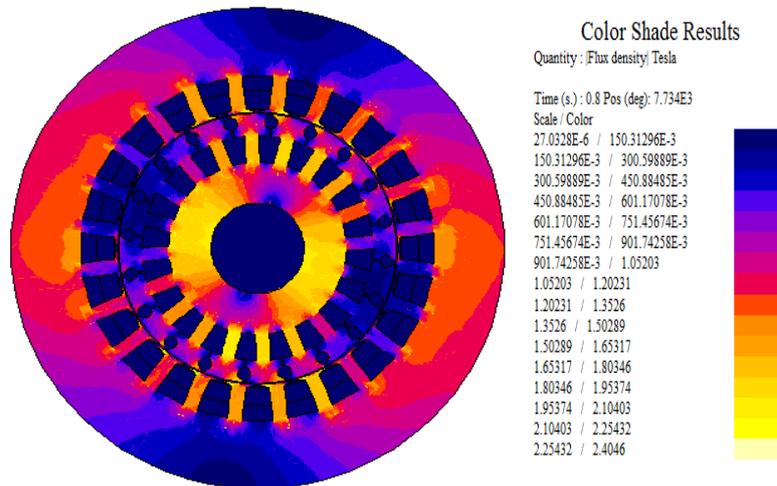


Figure. IV.6. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.8(s)

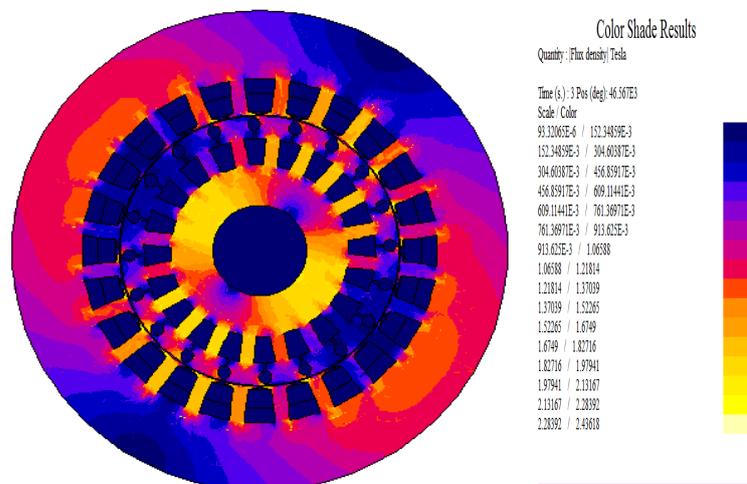


Figure. IV.7. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 3(s)

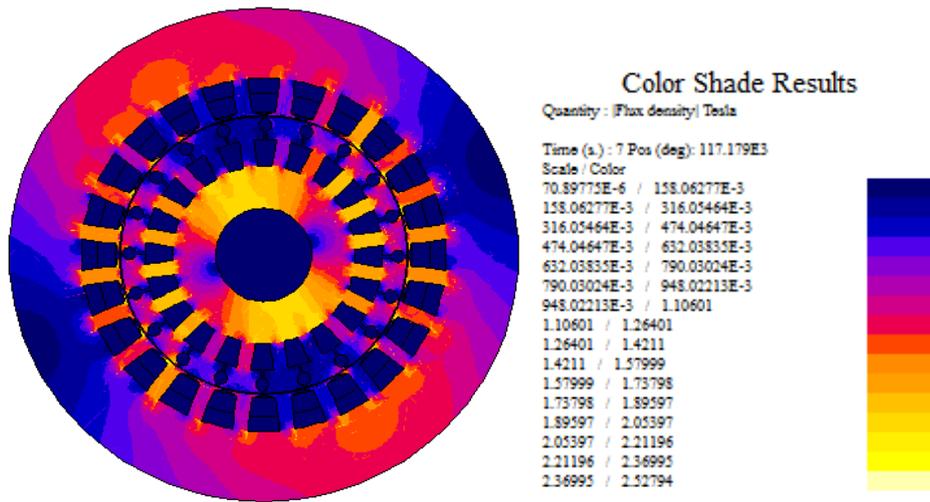


Figure. IV.8. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 7(s)

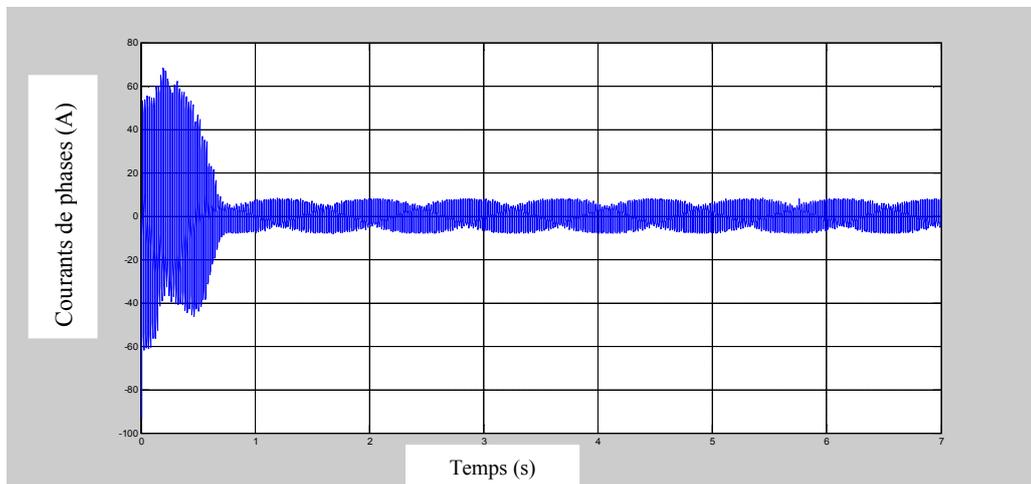


Figure. IV.9. Forme d'onde du courant statorique phase V\_U

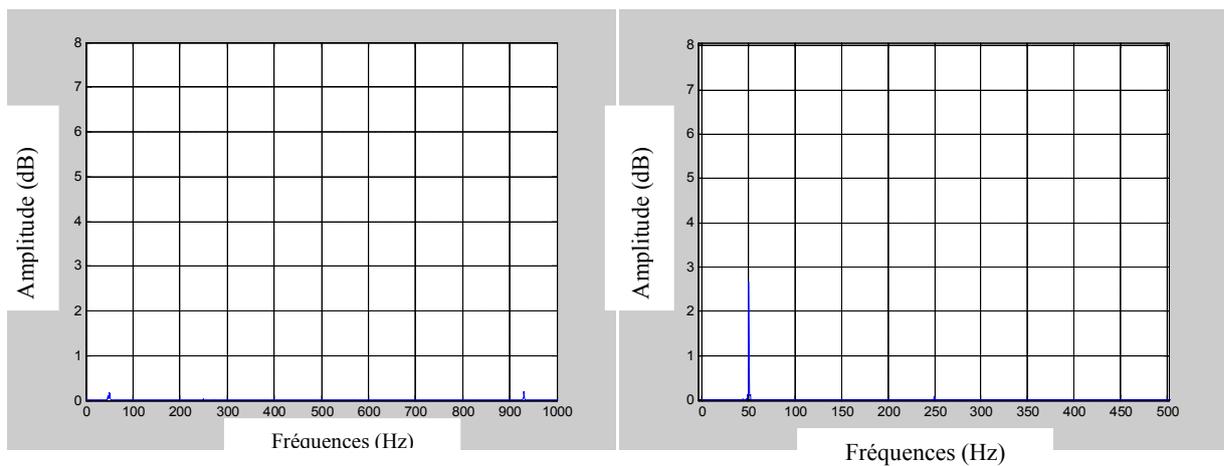


Figure. IV.10. Spectre (avec zoom) du courant statorique phase V\_U.

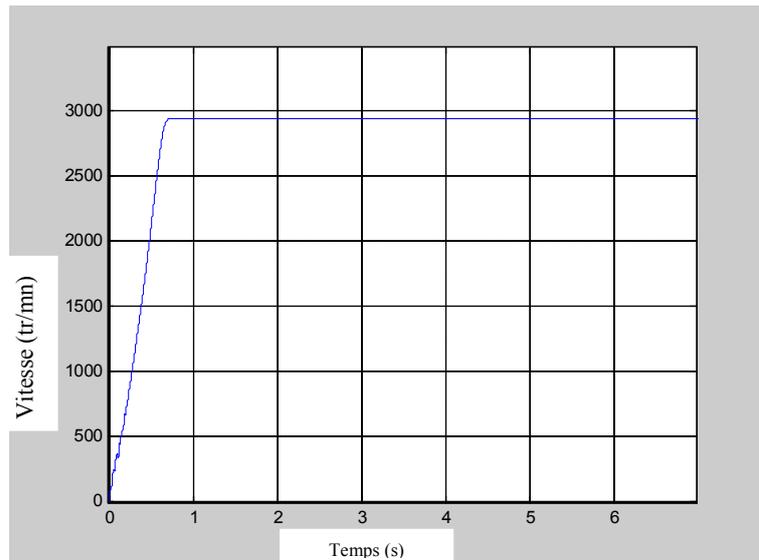


Figure. IV.11. Vitesse de rotation de la machine.

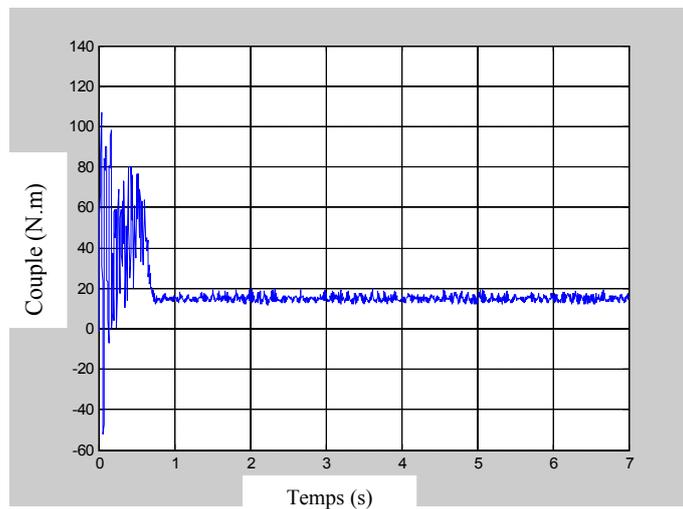


Figure. IV.12. Couple électromagnétique de la machine.

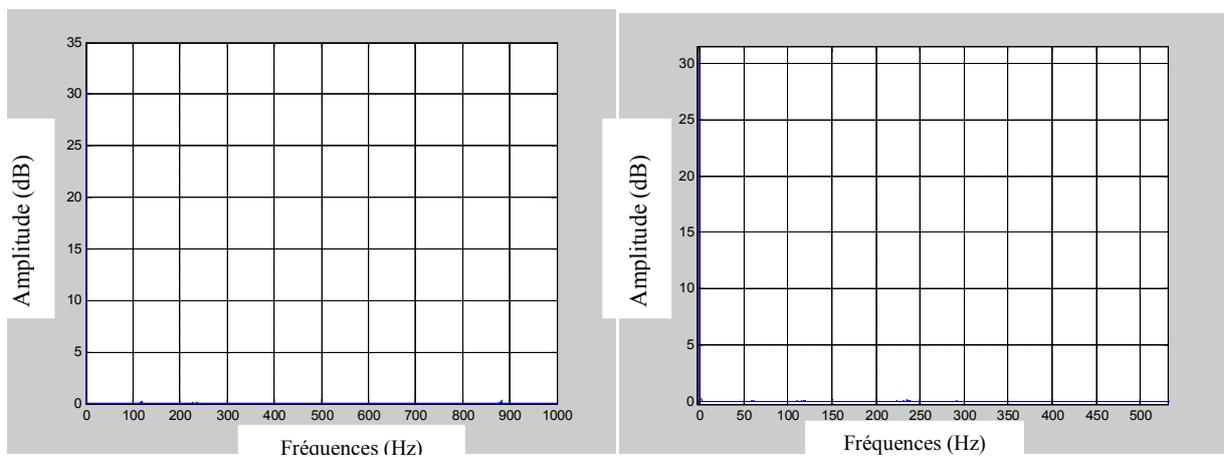
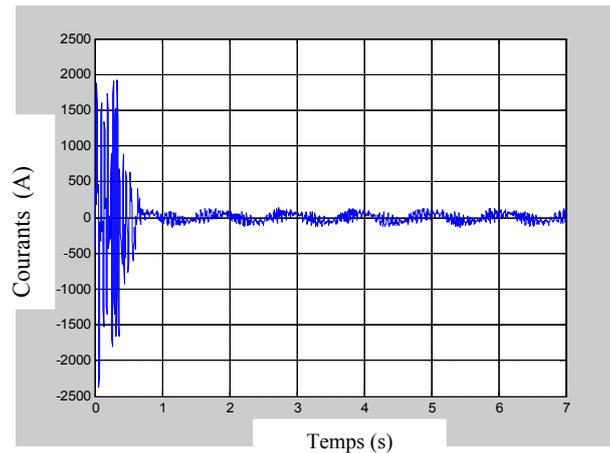
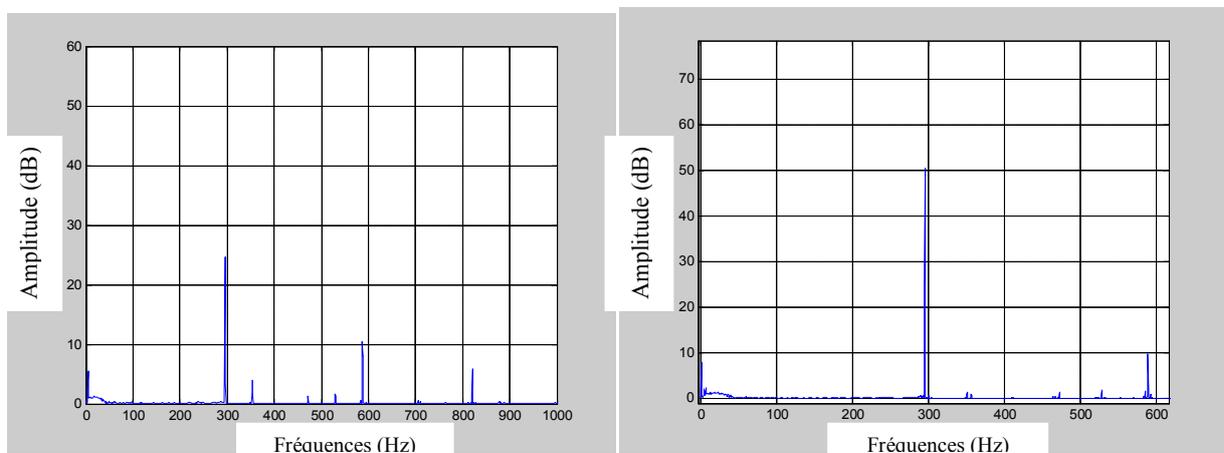


Figure. IV.13. Spectre du Couple électromagnétique (avec zoom) de la machine.

**Figure. IV.14.**Le courant d'une barre cassée (5).**Figure. IV.15.**Spectre (avec zoom) du courant d'une barre cassée(5).

## IV.2.2 Cas de cassure des deux barres :

### IV.2.2.1 Résultats de la simulation de cassure des deux barres.

Les résultats ci-dessous présentent les résultats des simulations du comportement électrique, magnétique et mécanique d'une machine asynchrone ayant un défaut rotorique. Dans cette partie, nous avons augmenté le nombre de barres cassées en deux. Ceci peut être produit dans une machine réelle. De même comme le cas précédent, ce type de défaut est modélisé par augmentation de la résistance de la barre rotorique concerné par le défaut. Les résultats présentés ci-dessous montrent une répartition asymétrique des lignes de champ magnétique à l'intérieur du défaut d'une part, aussi, la cassure de deux barres a influencer considérablement sur le comportement mécanique de la machine par l'apparition des oscillations au niveau du couple de la machine, ainsi sur la vitesse de rotation de la machine.

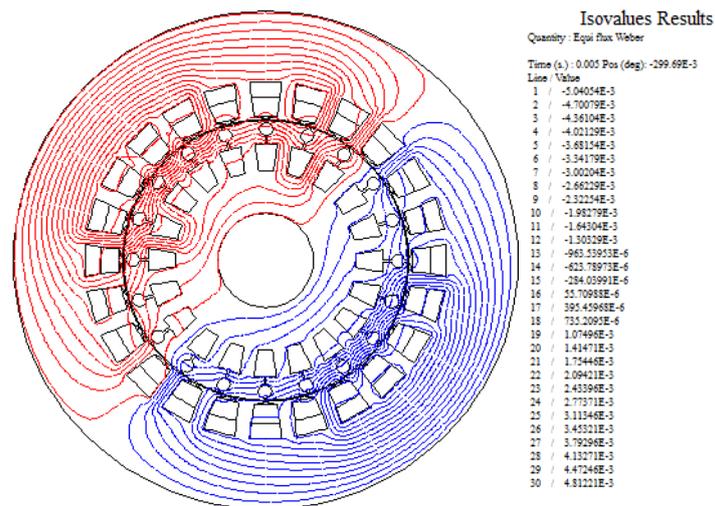


Figure. IV.16. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.005 (s).

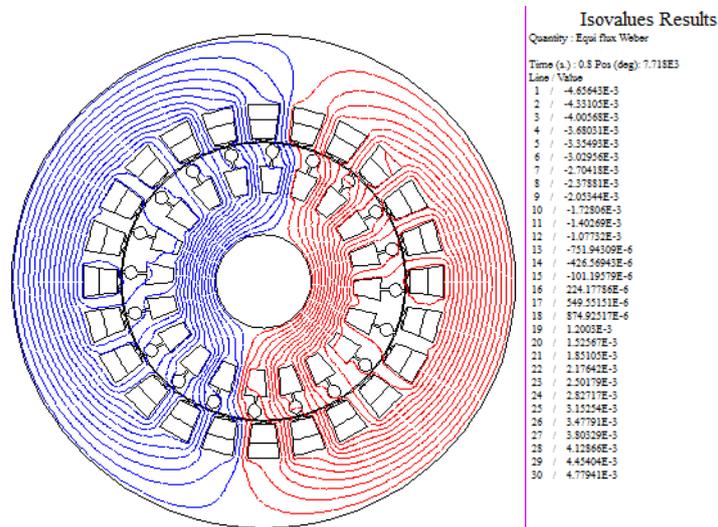


Figure. IV.17. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.005 (s).

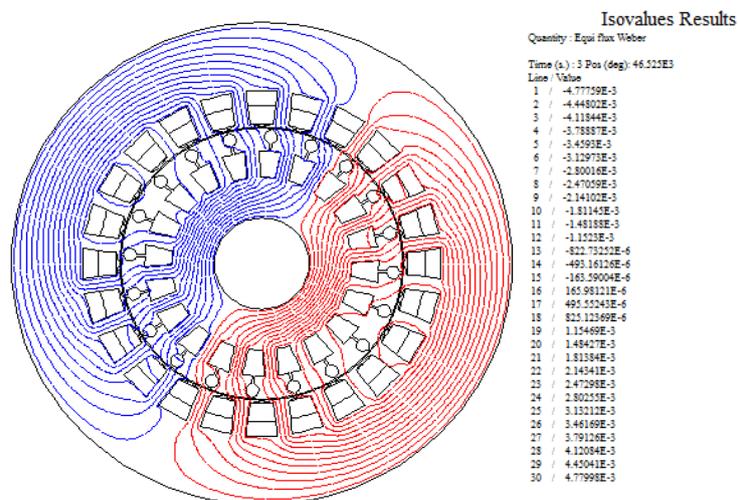


Figure. IV.18. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.005 (s).

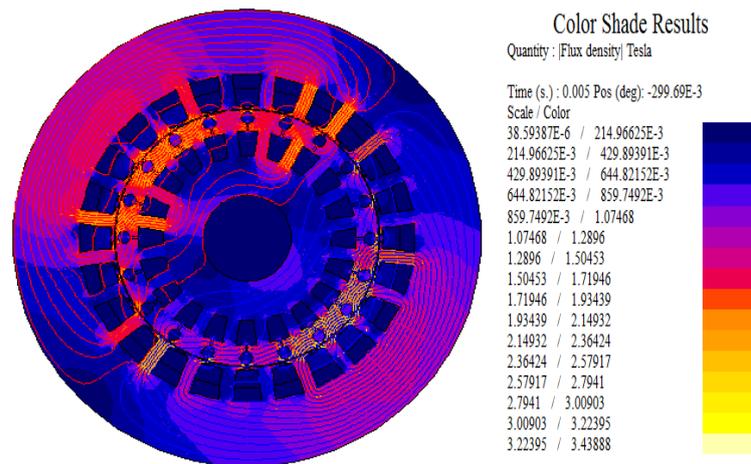


Figure. IV.19. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.005(s)

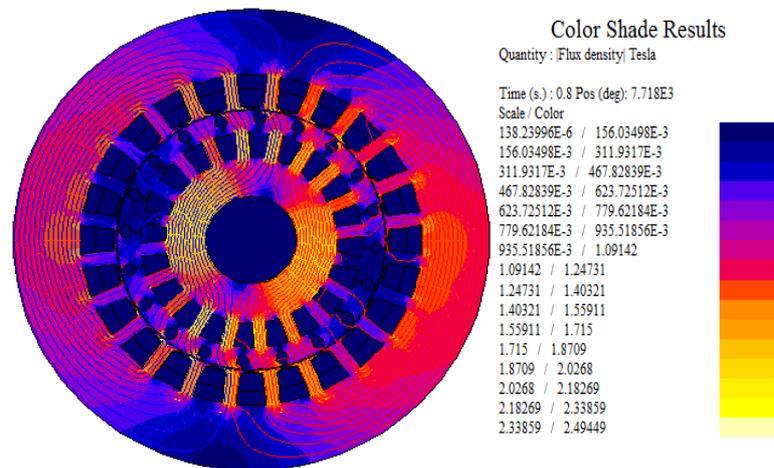


Figure. IV.20. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.8(s)

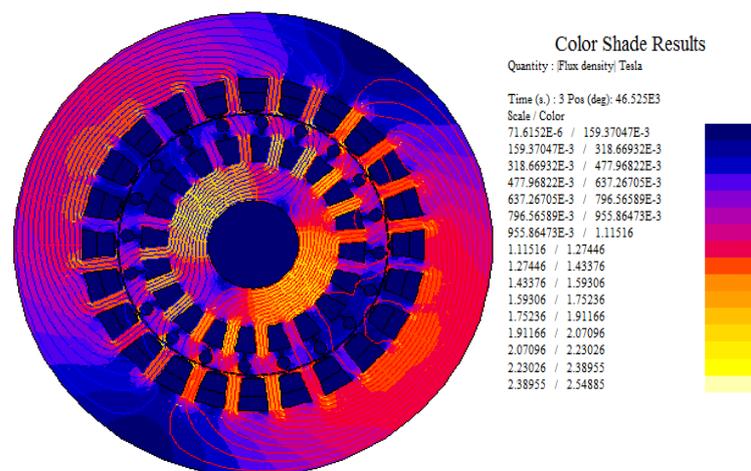


Figure. IV.21. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 3 (s)

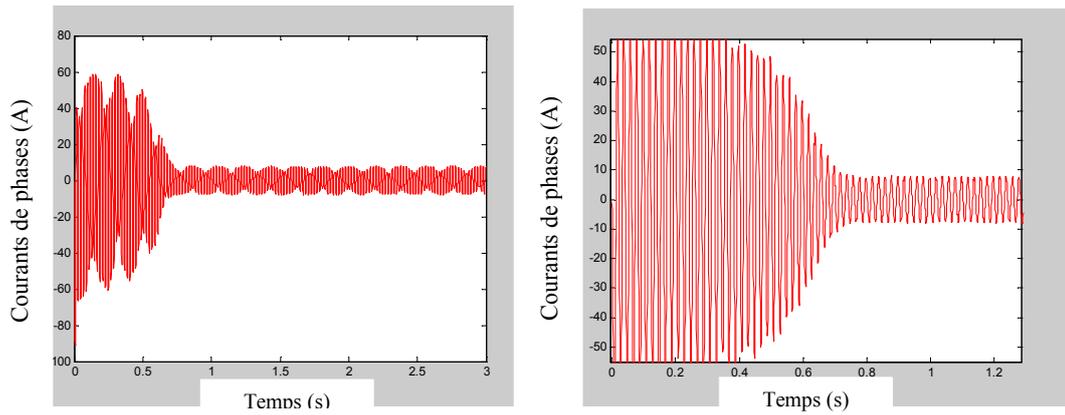


Figure. IV.22. Forme d'onde du courant statorique de la phase (avec zoom).

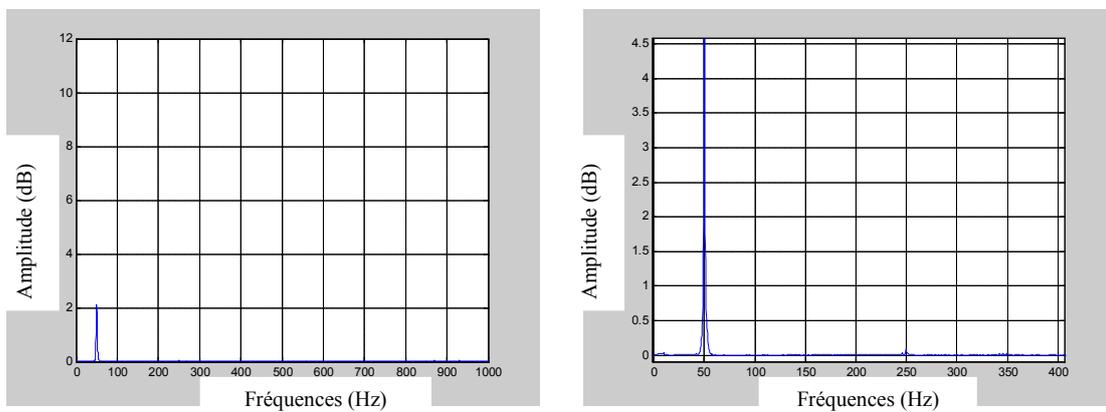


Figure. IV.23. Spectre (avec zoom) du courant statorique phase.

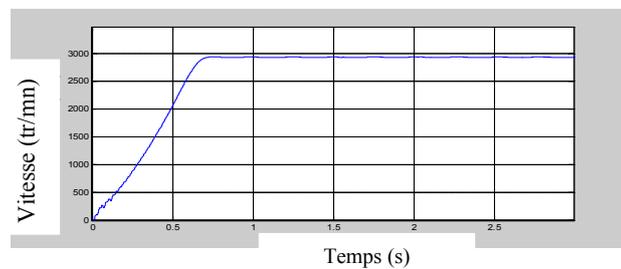


Figure. IV.24. Vitesse de rotation de la machine.

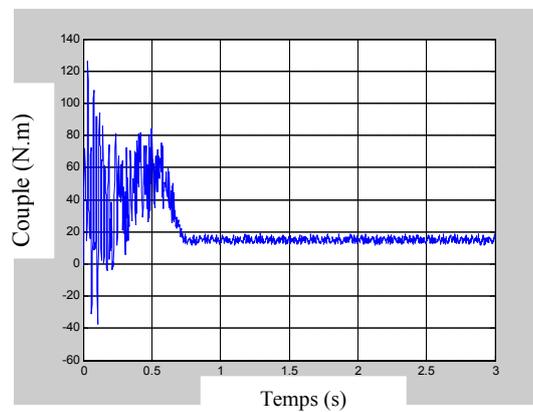


Figure. IV.25. Couple électromagnétique de la machine.

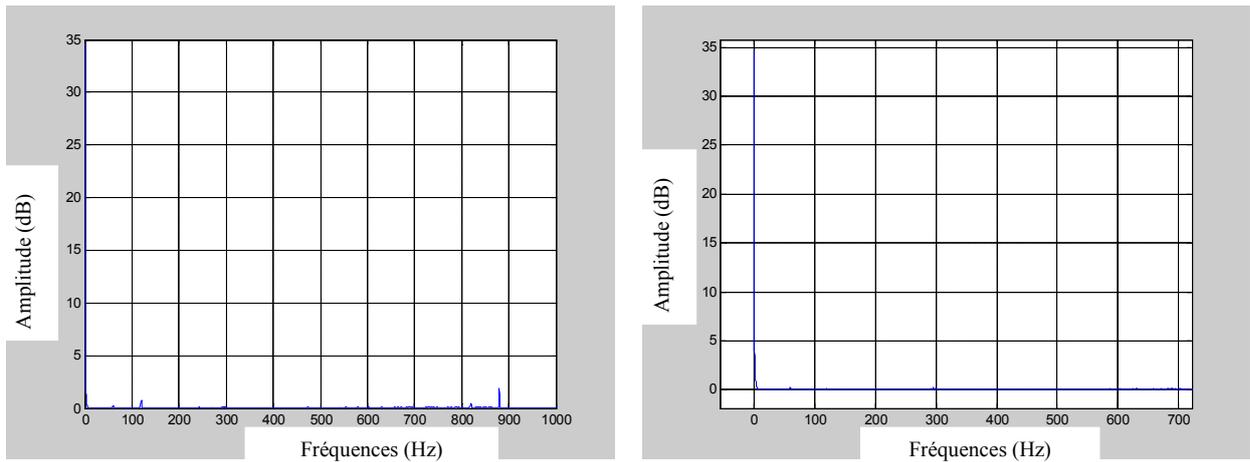


Figure. IV.26.Spectre du Couple électromagnétique (avec zoom) de la machine.

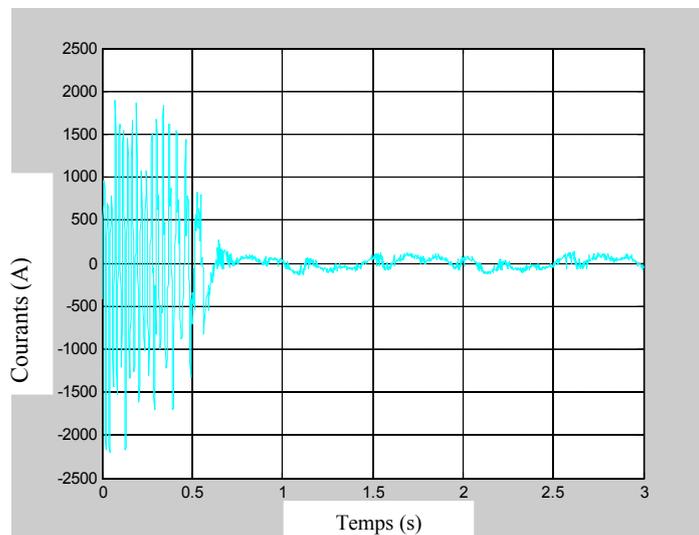


Figure. IV.27.Le courant d'une barre cassée (5).

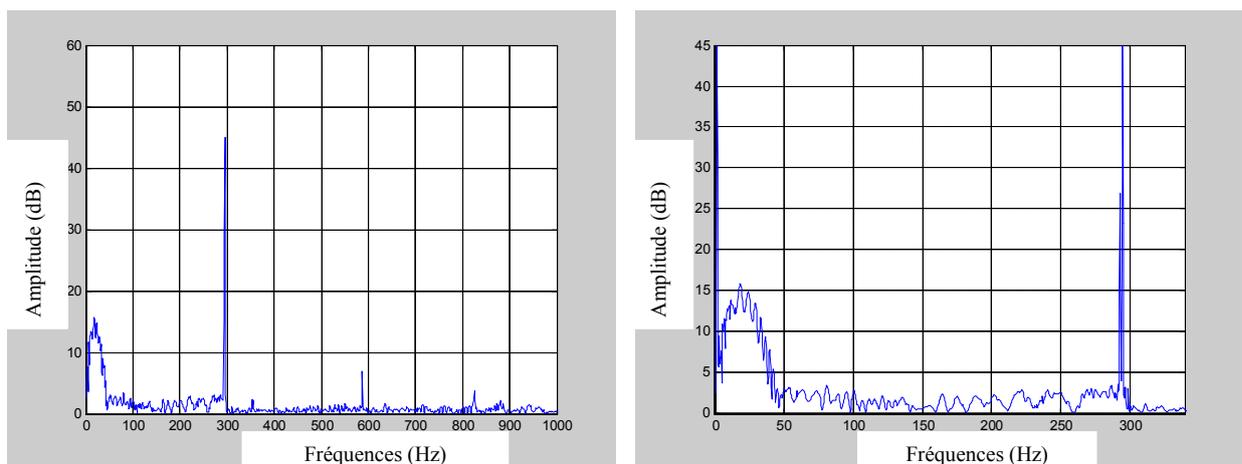
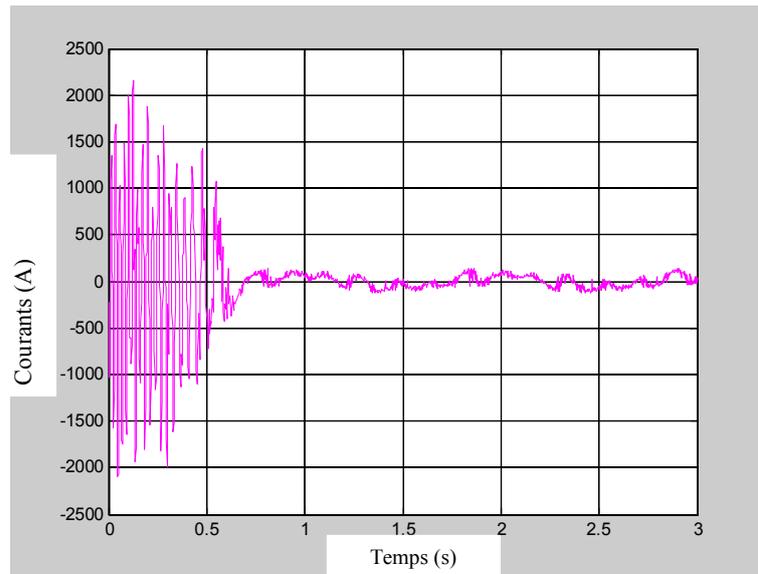
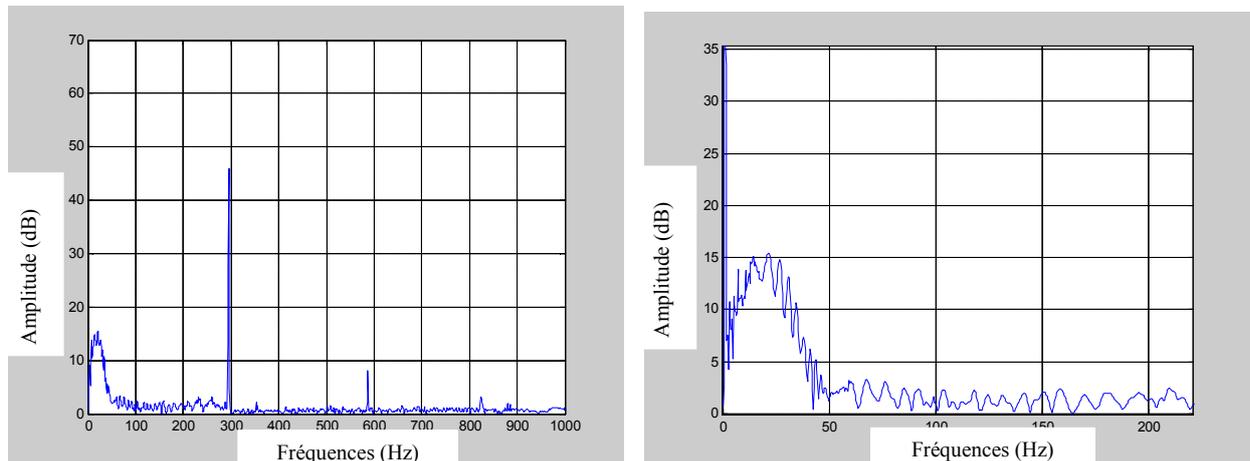


Figure. IV.28.Spectre (avec zoom) du courant d'une barre cassée(5).



**Figure. IV.29.**Le courant d'une barre cassée (10).



**Figure. IV.30.**Spectre (avec zoom) du courant d'une barre cassée (10).

## IV.2.3 Cas de cassure des trois barres

### IV.2.3.1 Résultats de la simulation de cassure des deux barres.

Dans la partie ci-dessous nous présentons les résultats des simulations du comportement de la machine doté cette fois-ci de trois barres cassées. Avec l'augmentation de nombre de barres cassées, la sévérité du défaut sur le comportement de la machine augmente. On peut dire alors que la rupture d'une des barres rotoriques influe sur le comportement de la machine, cette influence augmente avec augmentation du nombre de barre affecté par le défaut.

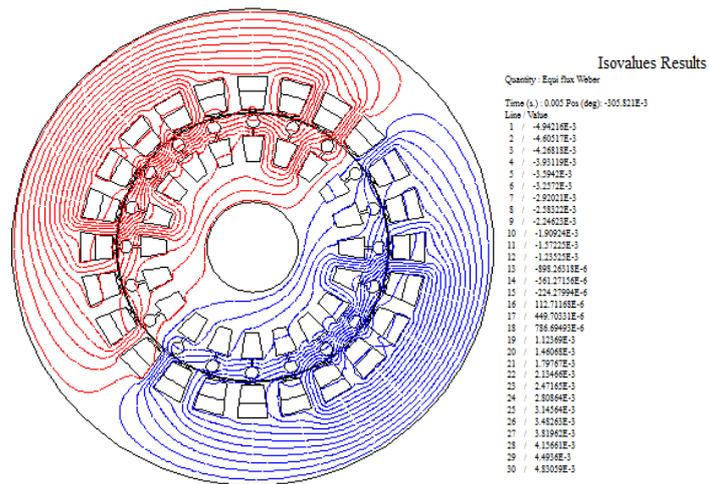


Figure. IV.31. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.005 (s).

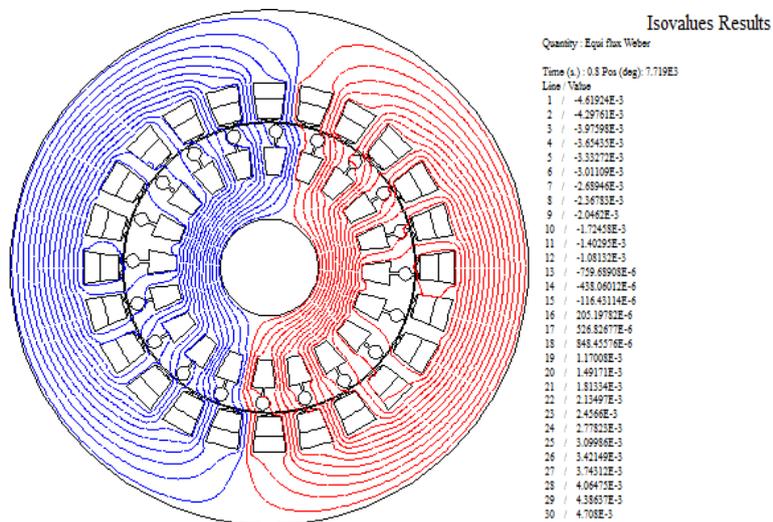


Figure. IV.32. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.8 (s).

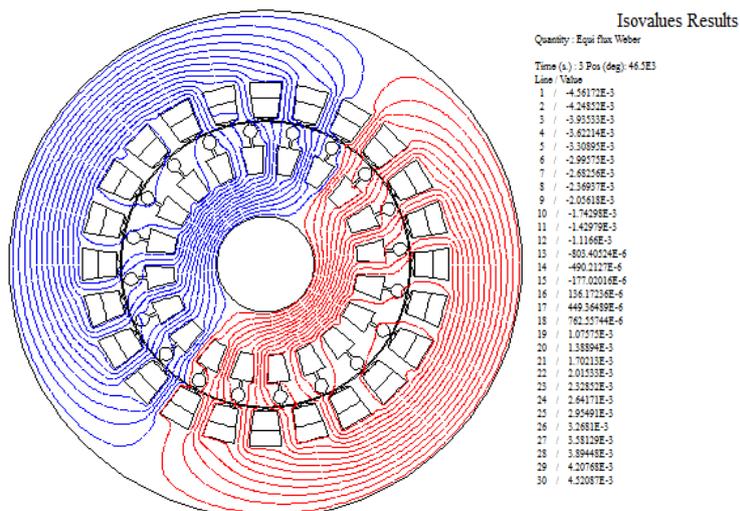


Figure. IV.33. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 3 (s).

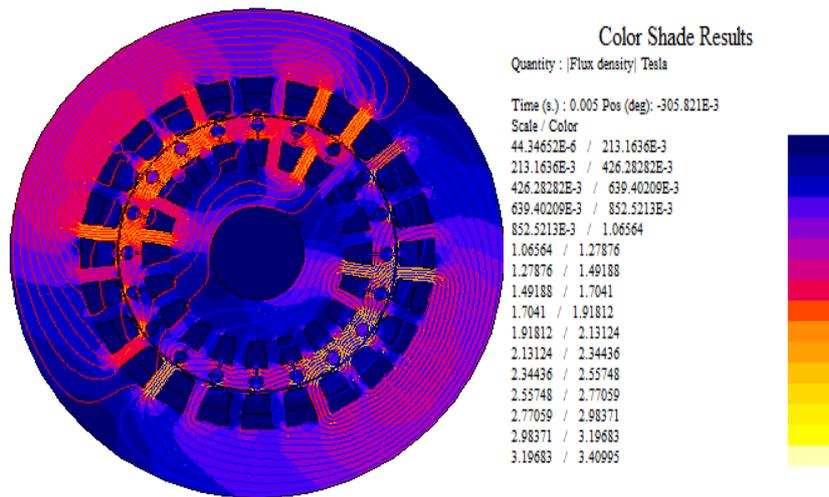


Figure. IV.34. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.005(s)

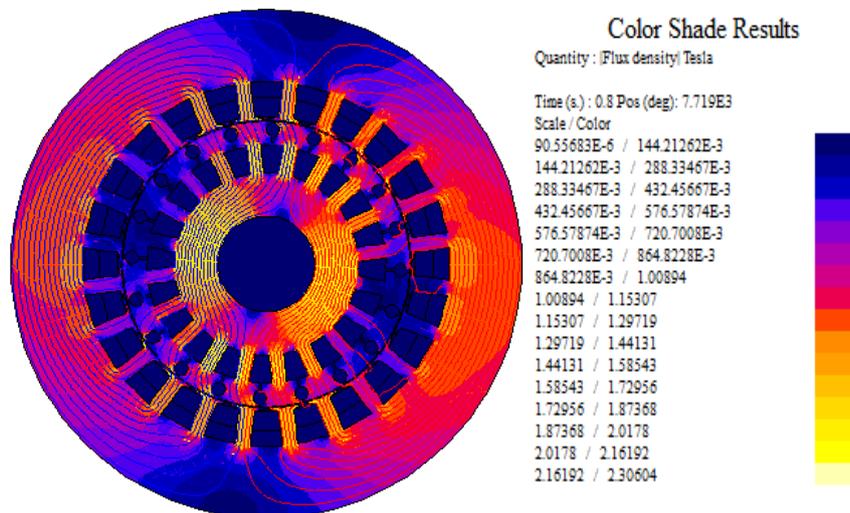


Figure. IV.35. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.8(s)

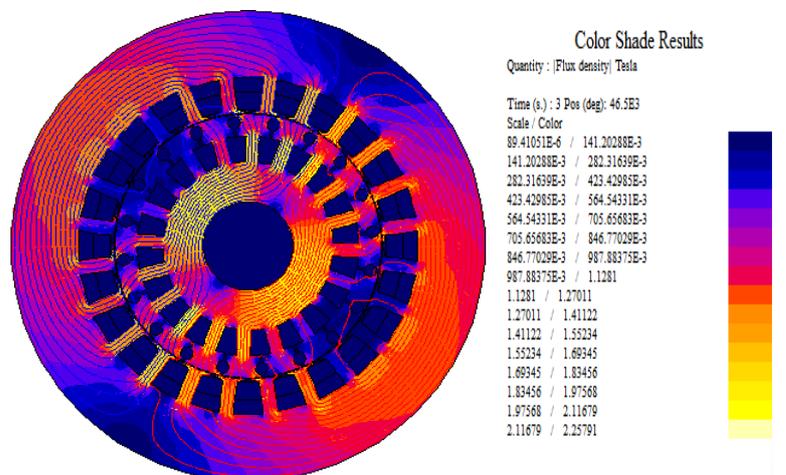


Figure. IV.36. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 7(s)

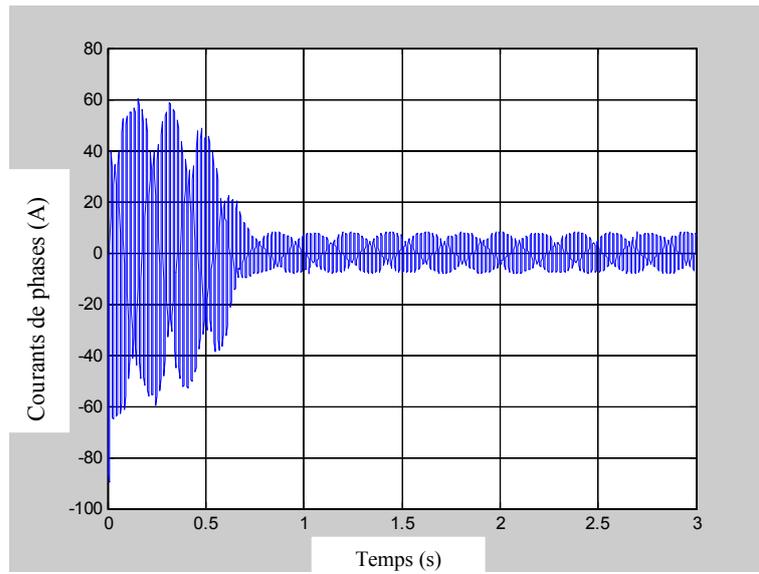


Figure. IV.37. Forme d'onde du courant statorique de la phase.

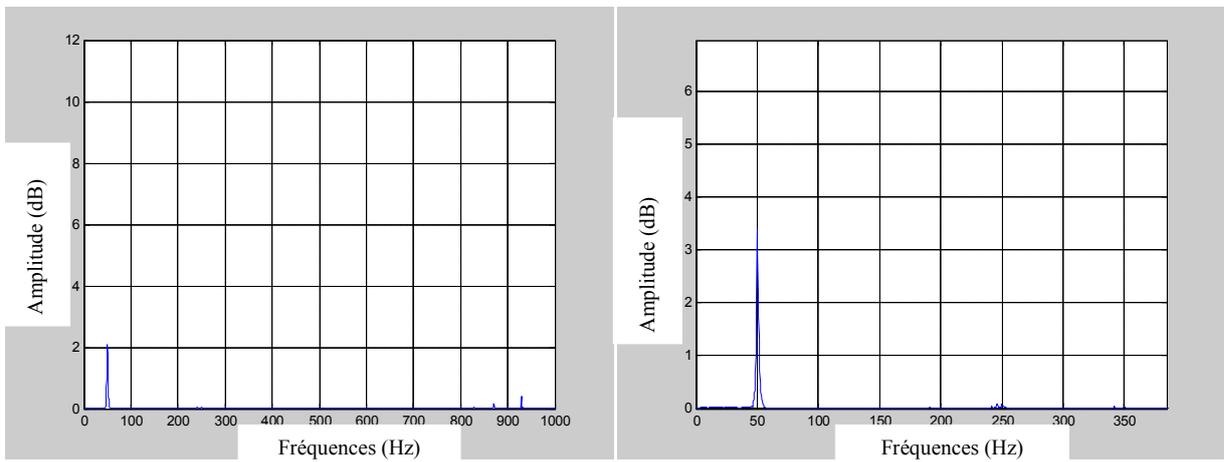


Figure. IV.38. Spectre (avec zoom) du courant statorique phase.

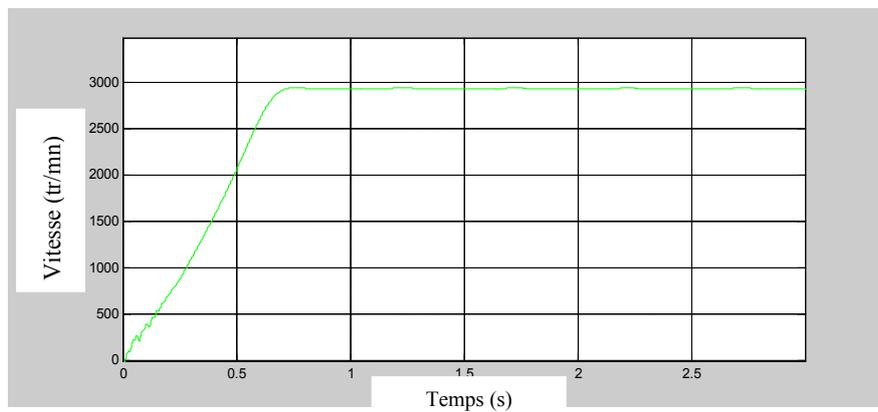


Figure. IV.39. Vitesse de rotation de la machine.

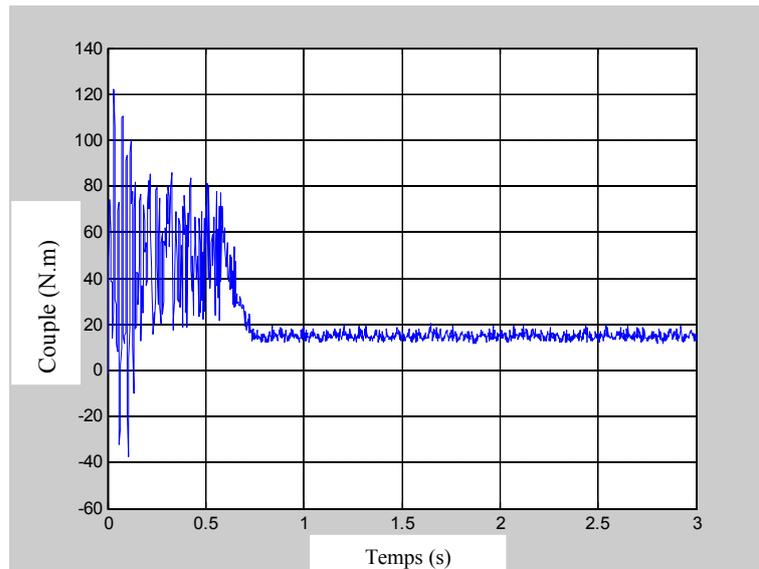


Figure. IV.40. Couple électromagnétique de la machine.

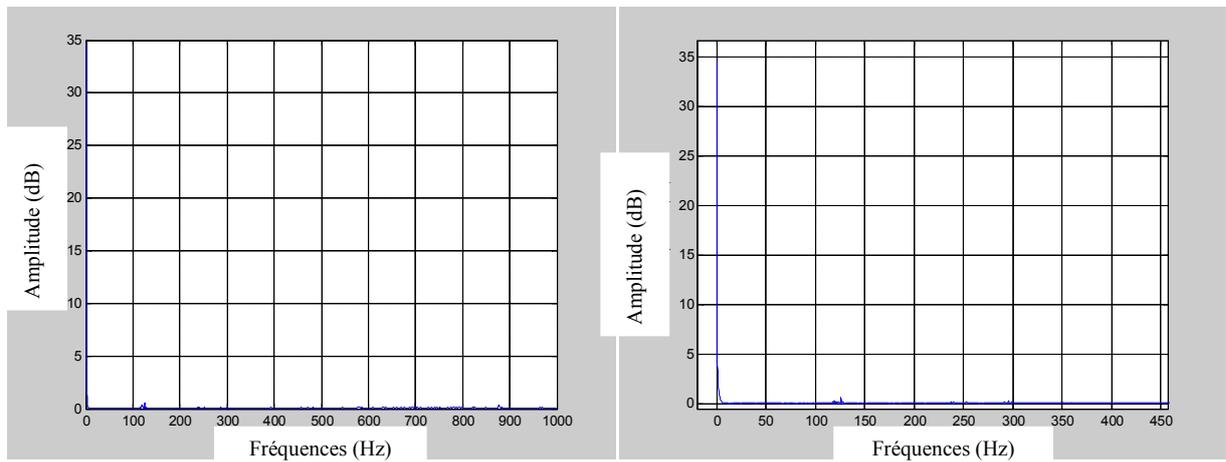


Figure. IV.41. Spectre du couple électromagnétique (avec zoom) de la machine.

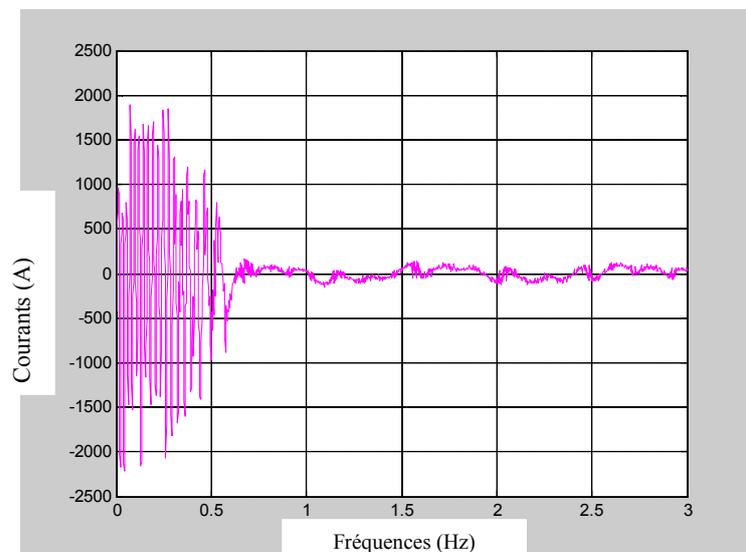


Figure. IV.42. Le courant d'une barre cassée (5).

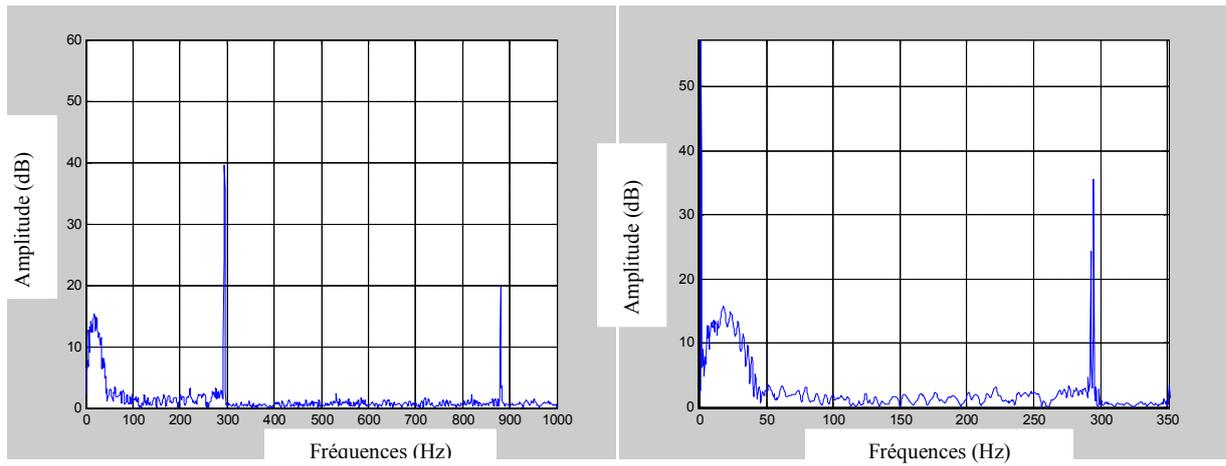


Figure. IV.43. Spectre (avec zoom) du courant d'une barre cassée(5).

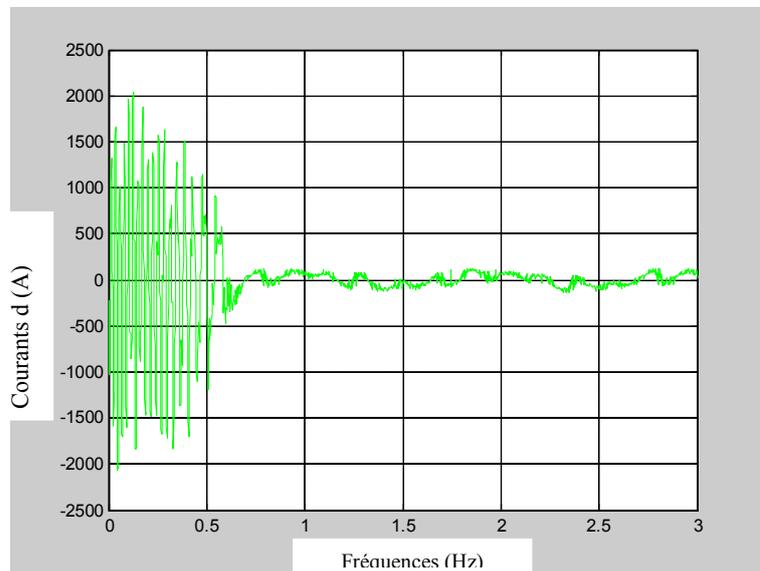


Figure. IV.44. Le courant d'une barre cassée (10).

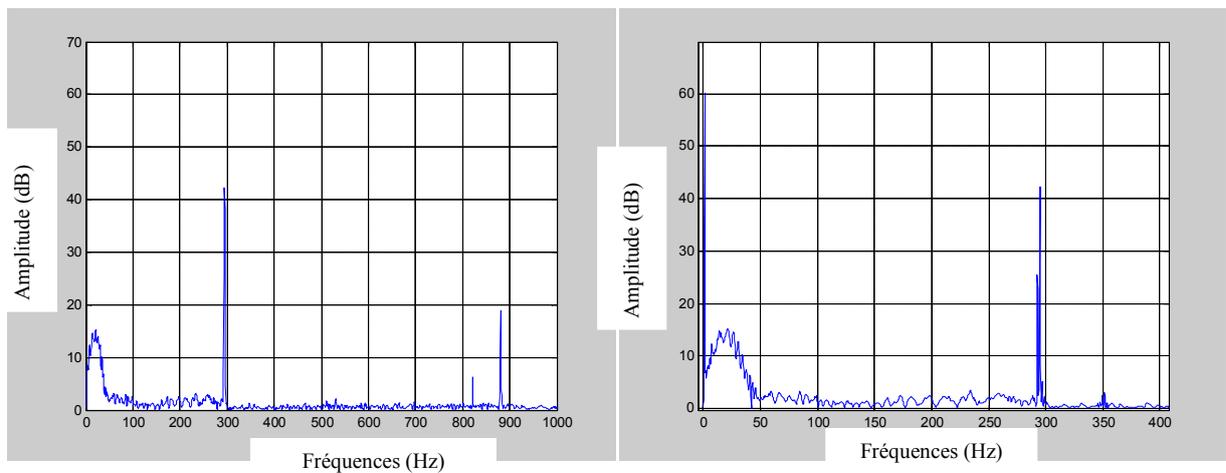
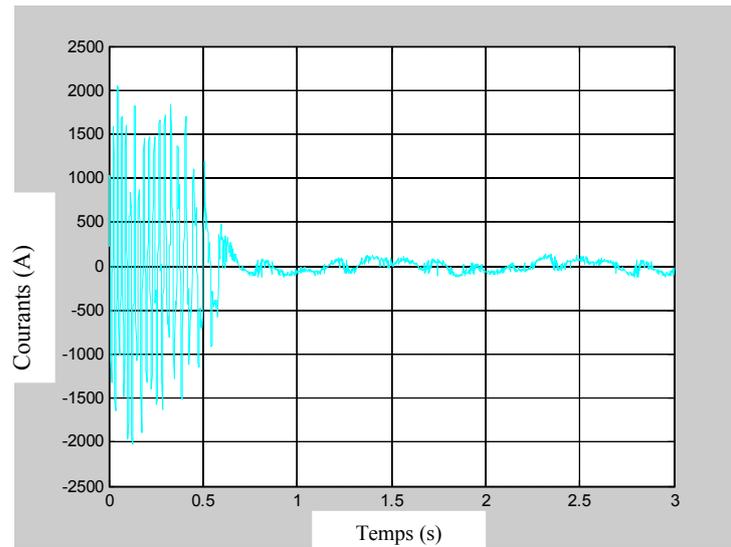
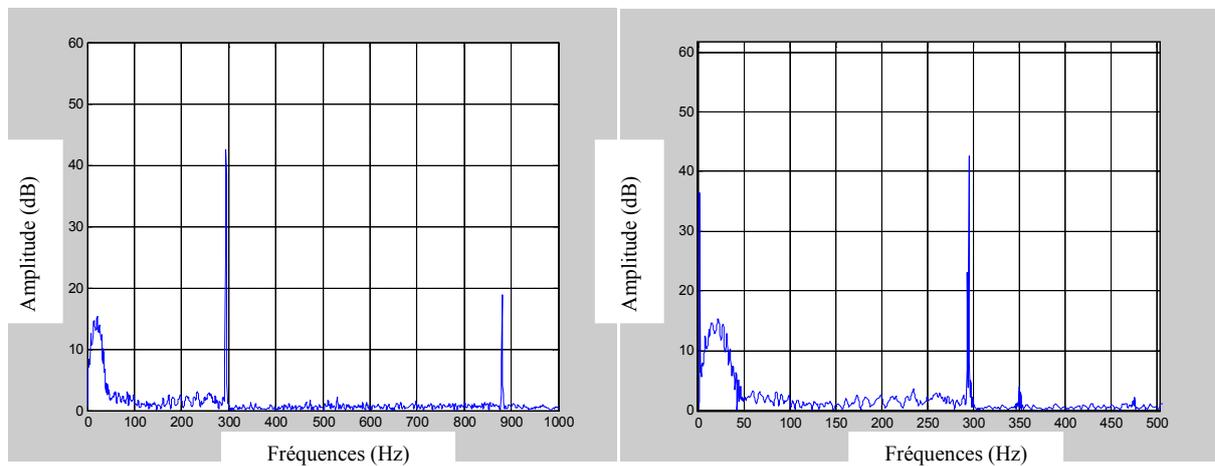


Figure. IV.45. Spectre (avec zoom) du courant d'une barre (10) cassée.



**Figure. IV.46.** Le courant d'une barre cassée (20).



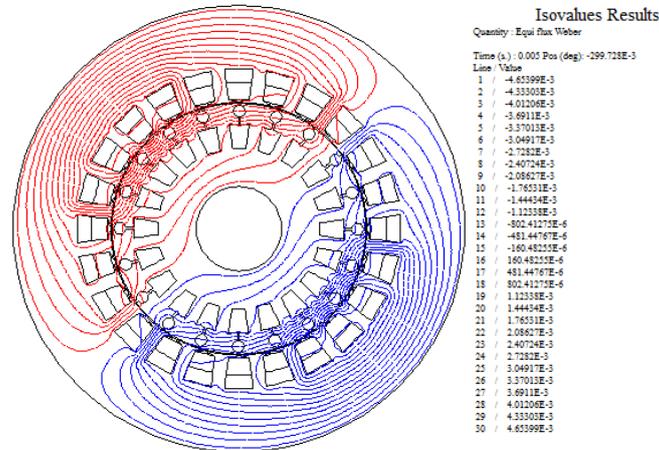
**Figure. IV.47.** Spectre (avec zoom) du courant d'une barre (20) cassée.

### **IV.3 Modélisation de la machine AS à cage avec défaut de déséquilibre d'alimentation.**

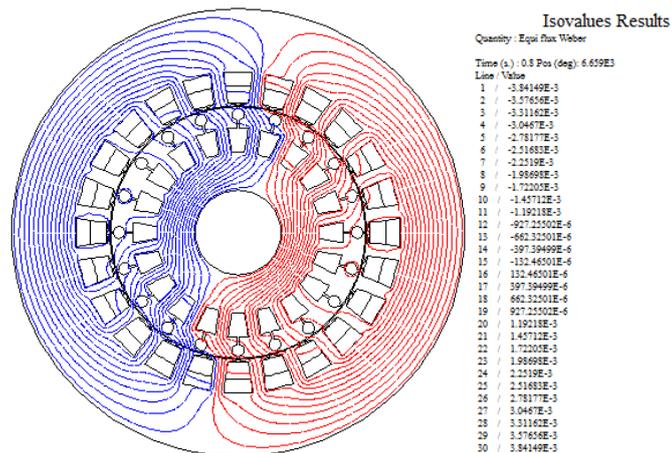
#### **IV.3.1 Cas d'une seule phase déséquilibré**

Dans cette partie nous présentons les résultats des simulations du comportement magnétique et mécanique et électrique de la MASY dans le cas d'un défaut qui est dû à un déséquilibre d'alimentation d'une des phases statoriques. Dans un premier temps, nous présentons les résultats des simulations du comportement de la machine ayant un déséquilibre d'une seule phase statorique, puis deux, puis trois et enfin avec un défaut rotorique qui est du a une rupture d'une barre rotorique. Les résultats montrent, qu'avec un déséquilibre d'une seule phase, le comportement de la machine différé par rapport a celle d'une machine saine, l'analyse

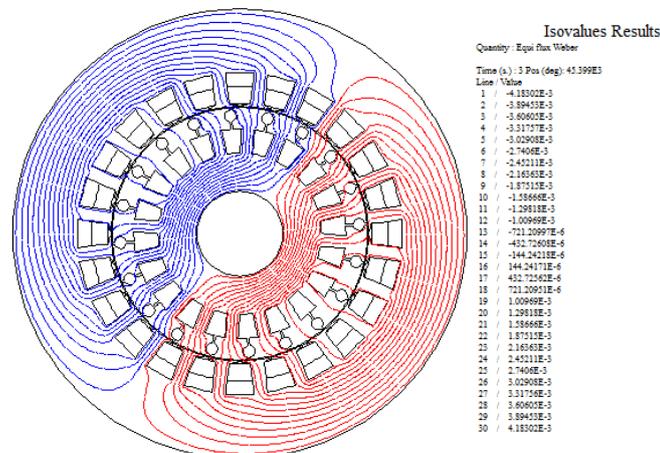
spectrale du courant statorique et du couple de montre l'existence du défaut par l'apparition d'harmoniques autour de la fondamentale. Les résultats des simulations montrent aussi qu'avec l'augmentation de nombre de phases de déséquilibres, la signature de défaut augmente aussi.



**Figure. IV.48.** Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.005 (s).



**Figure. IV.49.** Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 8 (s).



**Figure. IV.50.** Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 3 (s).

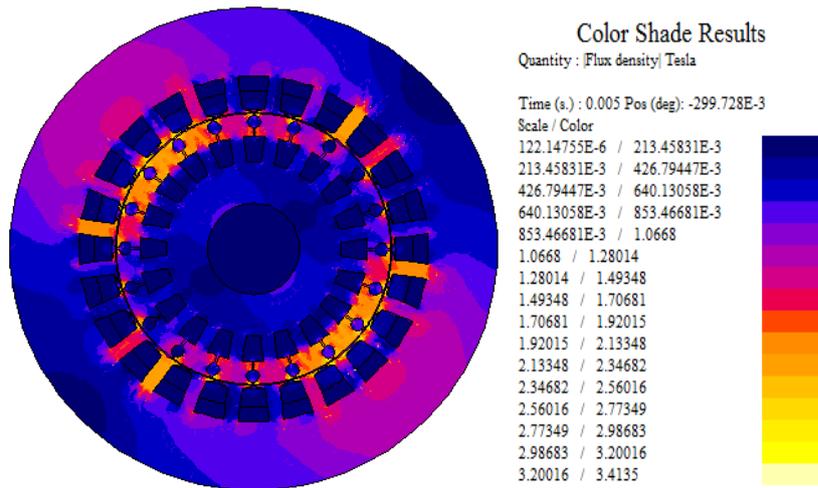


Figure. IV.51. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.005(s)

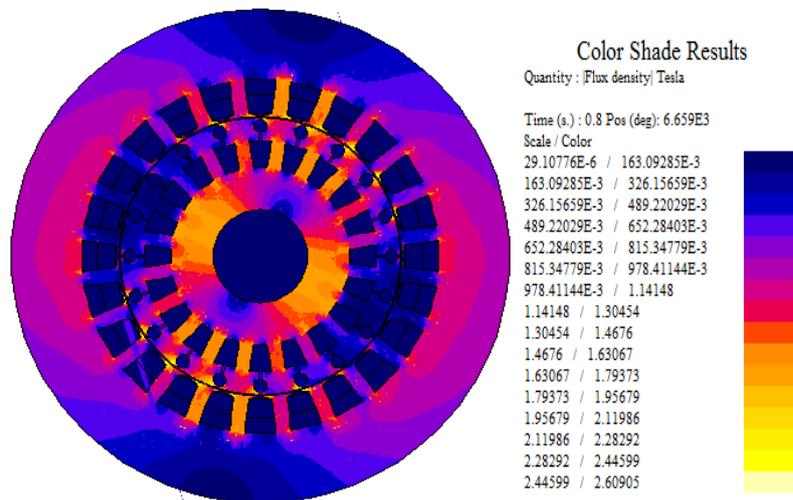


Figure. IV.52. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.8(s)

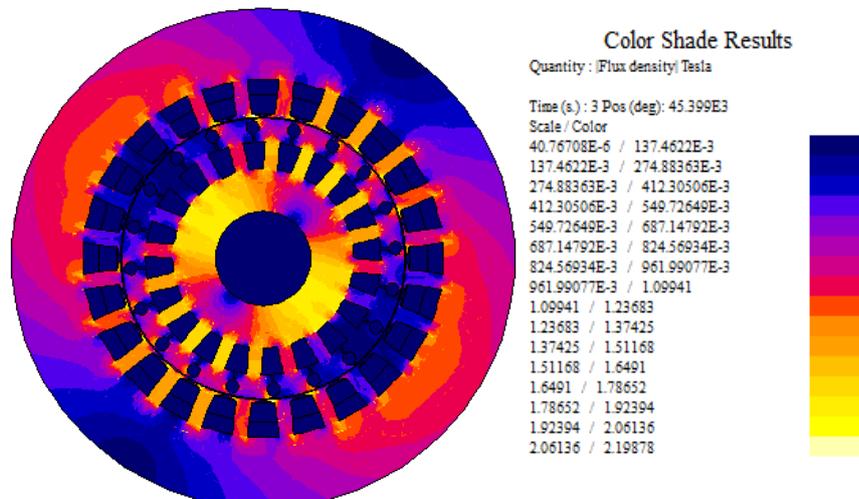


Figure. IV.53. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 3(s)

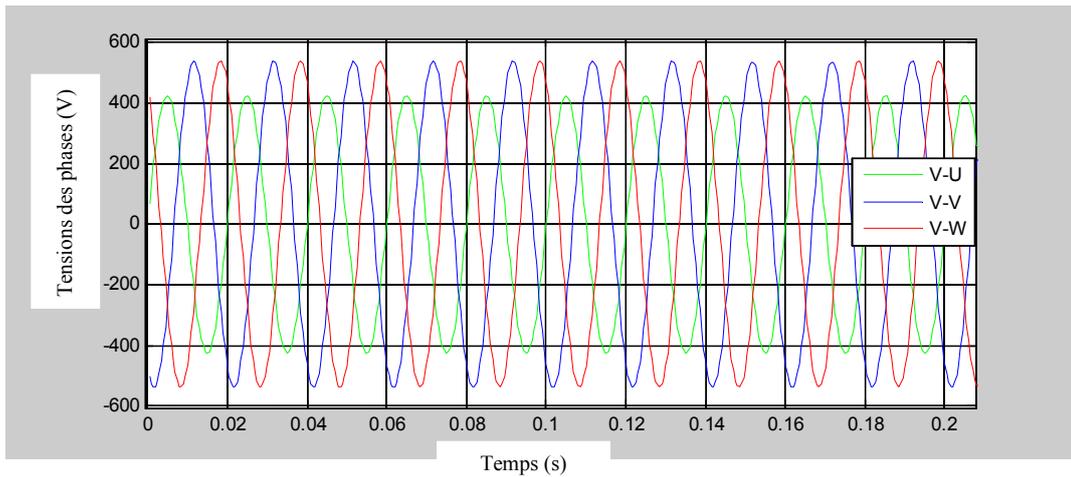


Figure. IV.54. Forme d'onde de la tension (tension V\_U déséquilibrée)

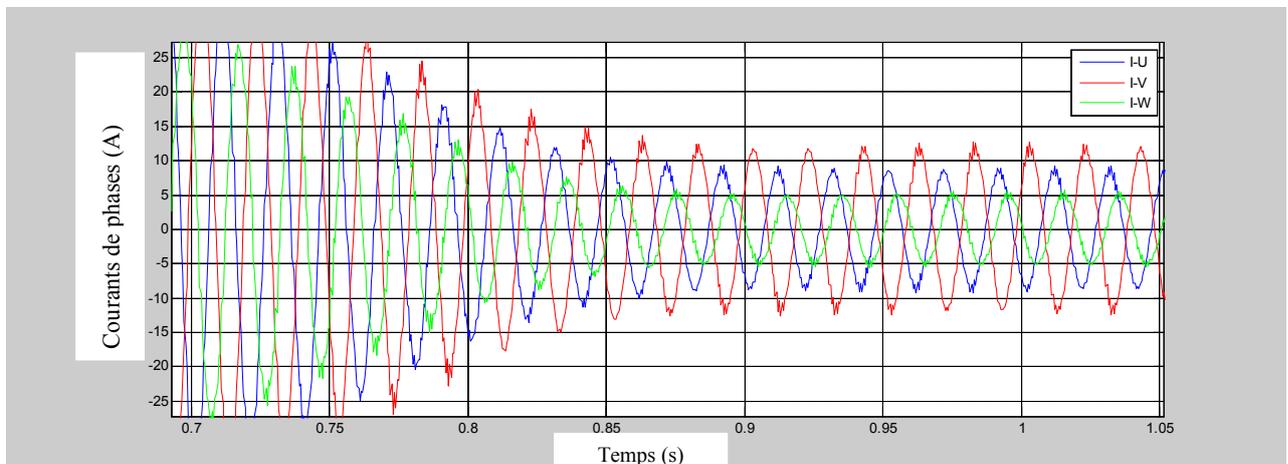


Figure. IV.55. Forme d'onde du courant statorique (phase V\_U déséquilibrée)

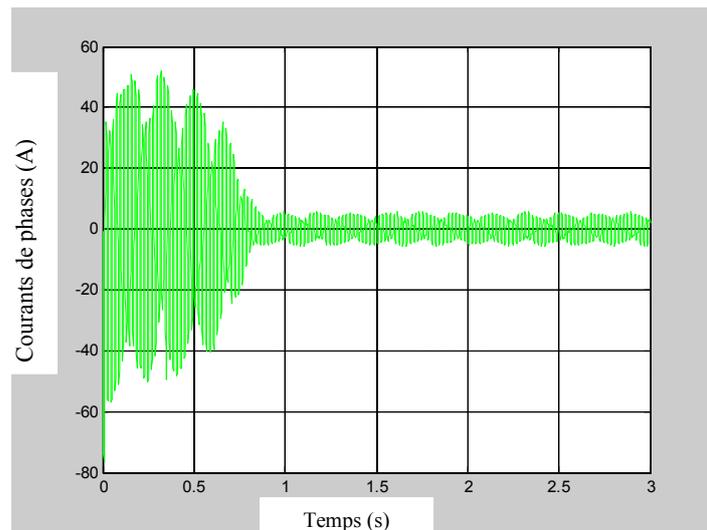


Figure. IV.56. Forme d'onde du courant statorique de la phase (phase V\_U déséquilibrée)

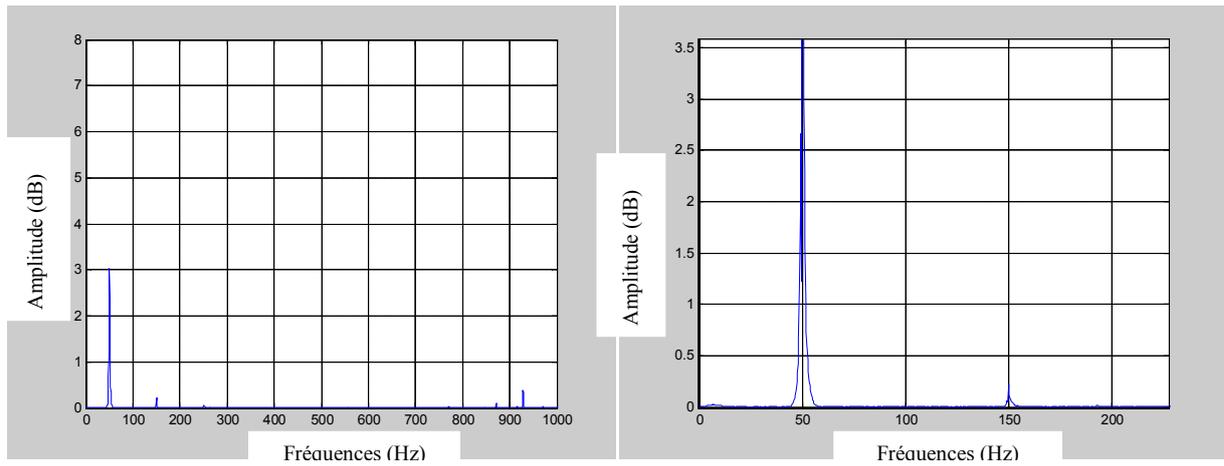


Figure. IV.57. Spectre (avec zoom) du courant statorique phase.

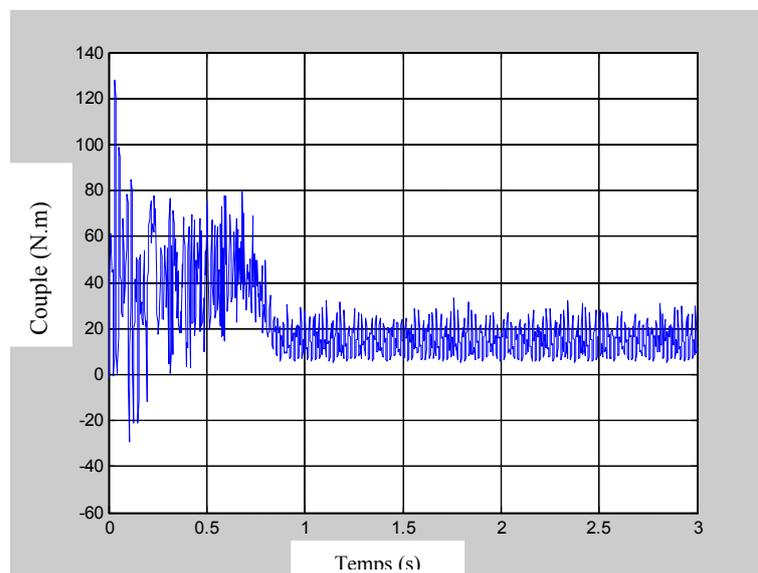


Figure. IV.58. Couple électromagnétique de la machine.

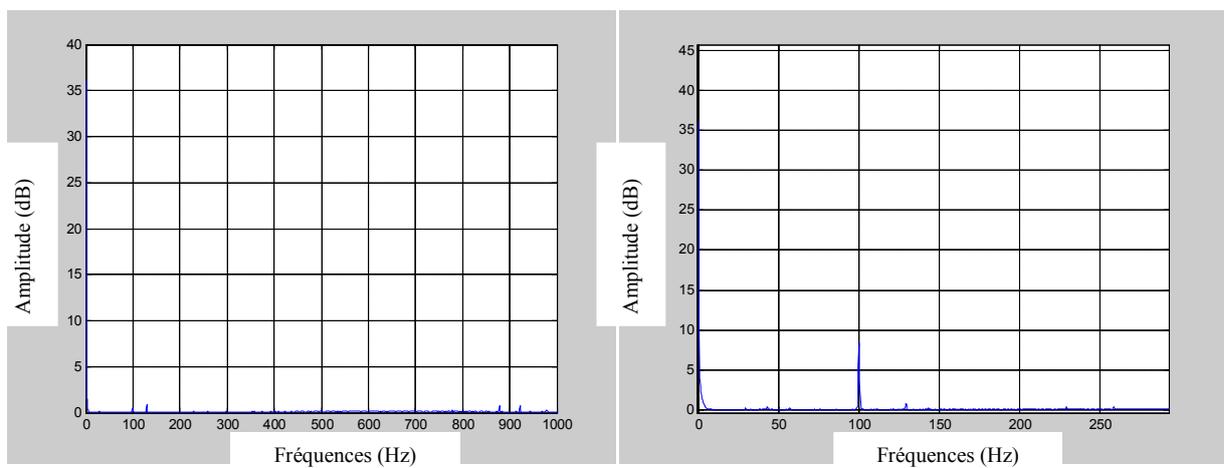


Figure. IV.59. Spectre du Couple électromagnétique (avec zoom) de la machine.

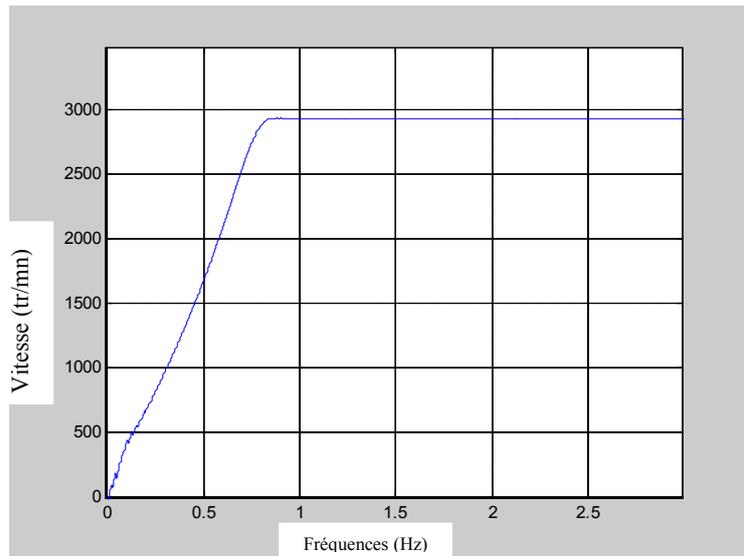


Figure. IV.60. Vitesse de rotation de la machine.

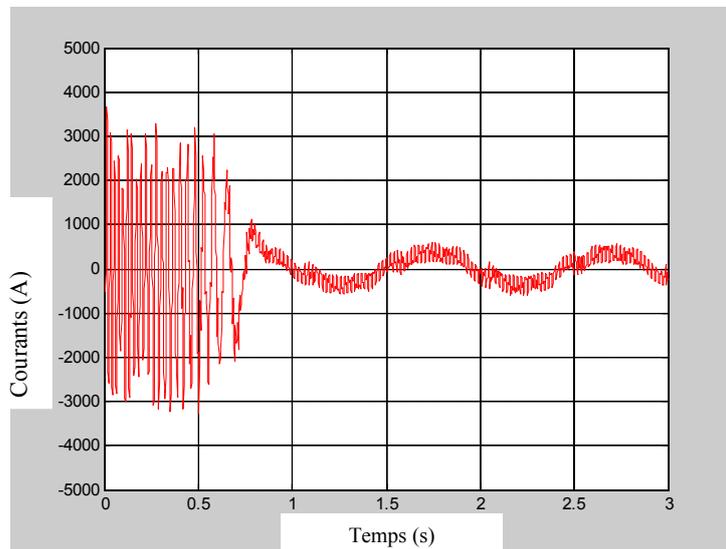


Figure. IV.62. Le courant d'une barre saine (5).

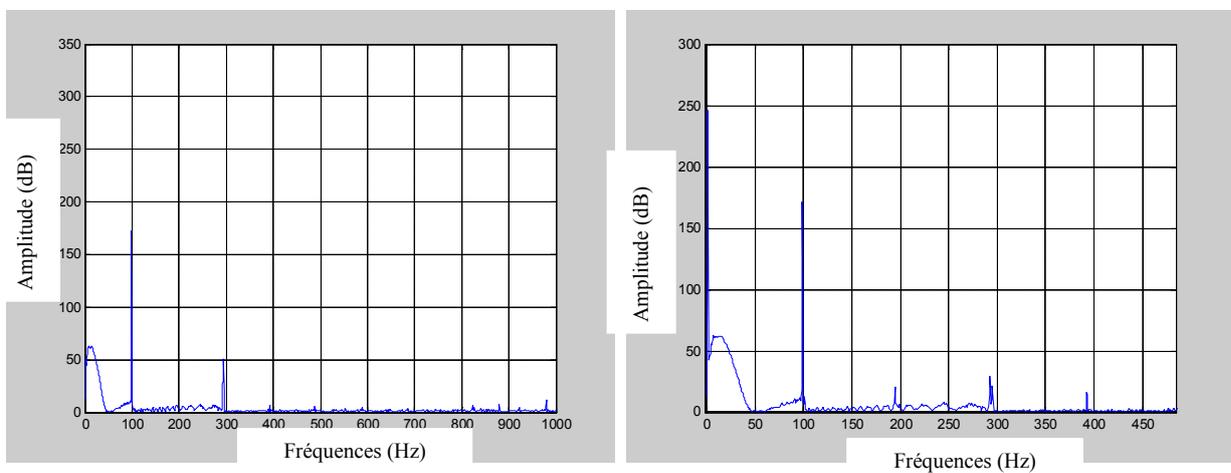


Figure. IV.63. Spectre (avec zoom) du courant d'une barre saine (5).

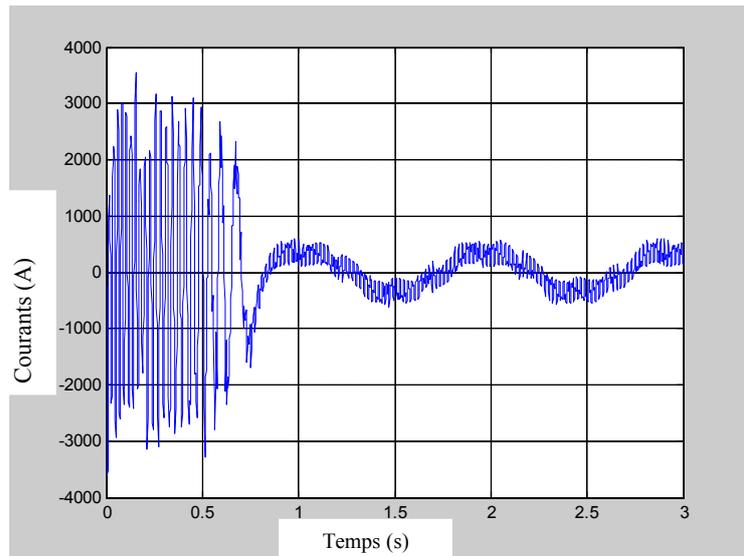


Figure. IV.64. Le courant d'une barre saine (10).

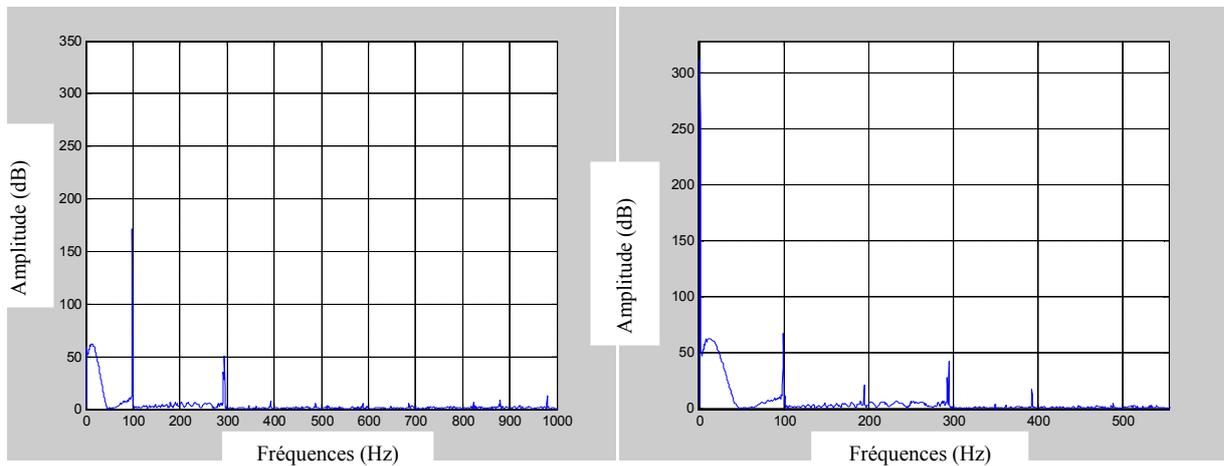


Figure. IV.65. Spectre (avec zoom) du courant d'une barre saine (10).

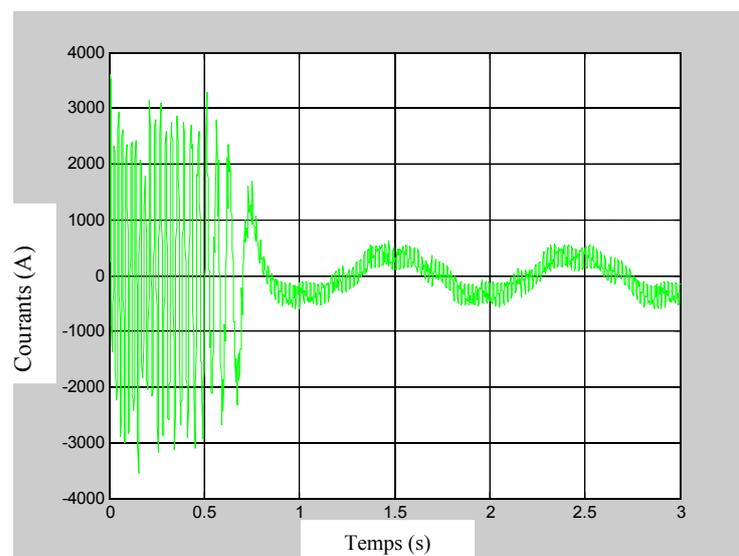


Figure. IV.66.. Le courant d'une barre saine (20).

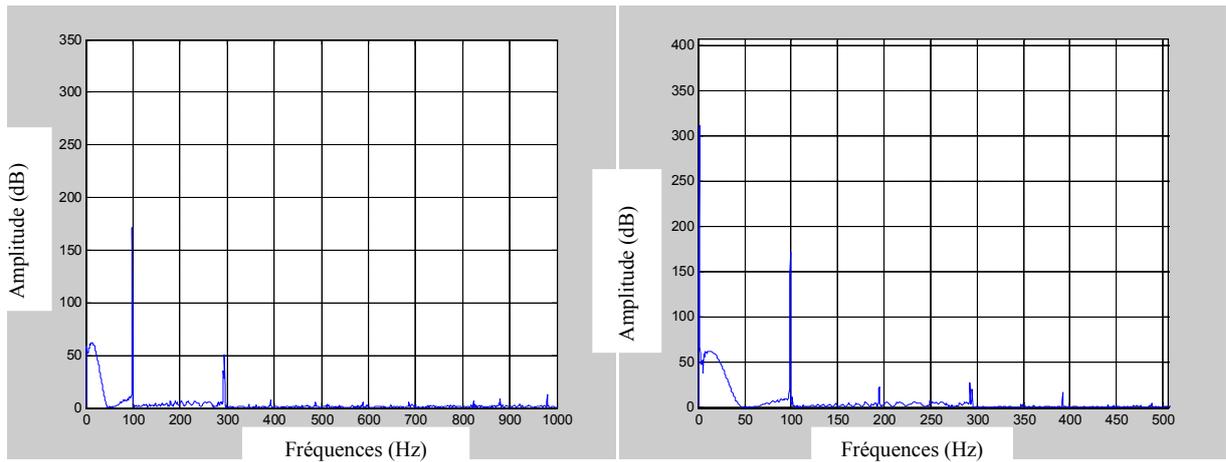


Figure. IV.67.Spectre (avec zoom) du courant d'une barre cassée (20).

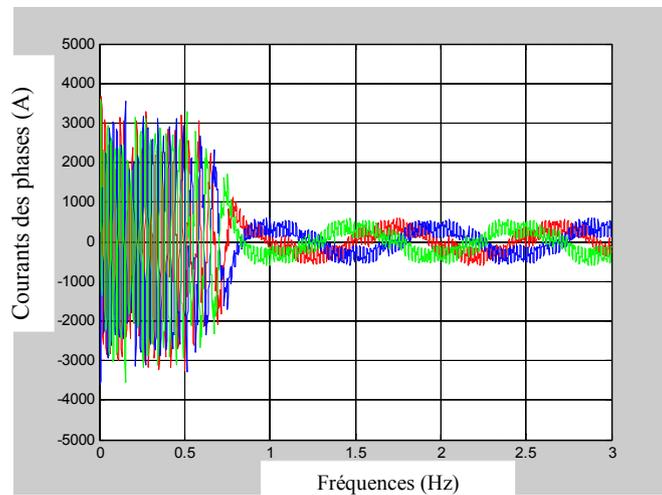


Figure. IV.68.Les courants des barres saine (5, 10,20).

### IV.3.2 Cas du deux phase déséquilibrée

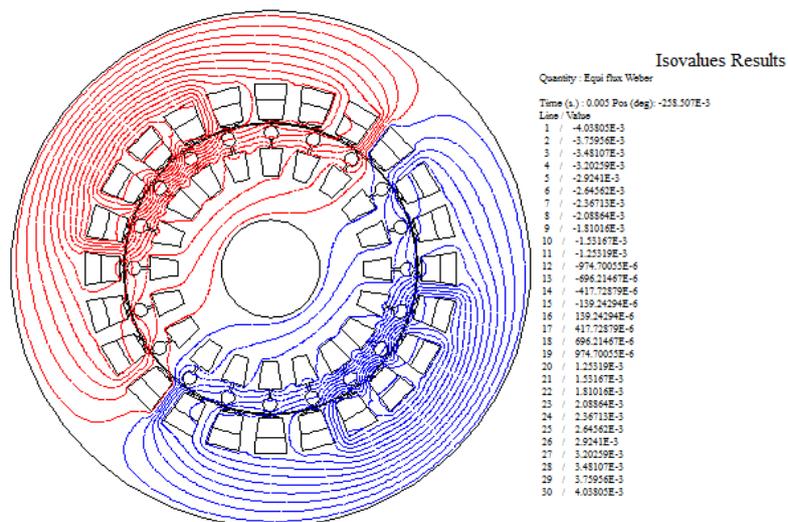


Figure. IV.69. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.005 (s).

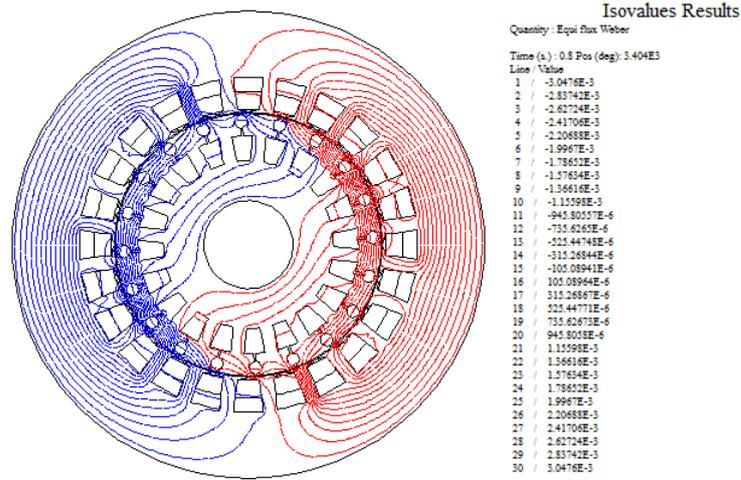


Figure. IV.70. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.8 (s).

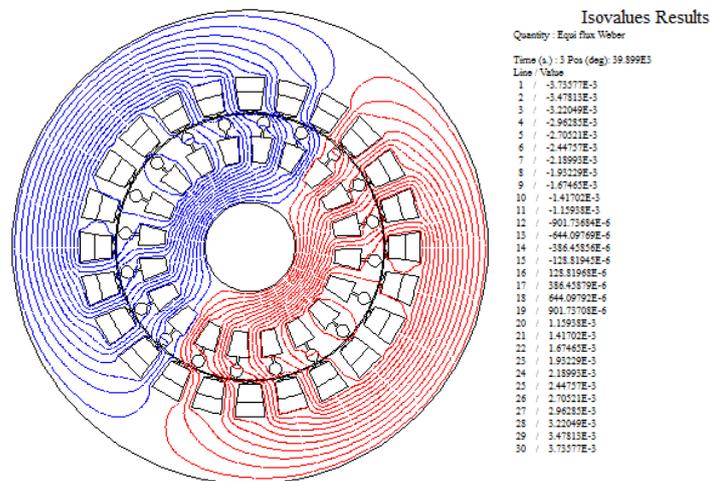


Figure. IV.71. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 3 (s).

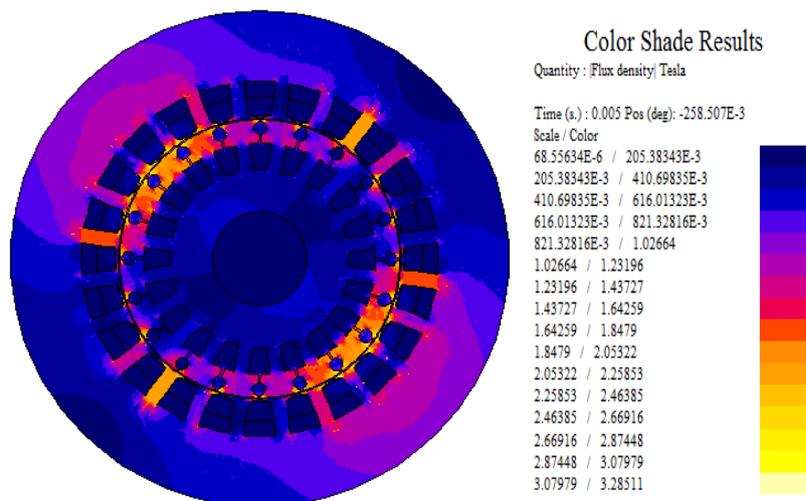


Figure. IV.72. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.005(s)

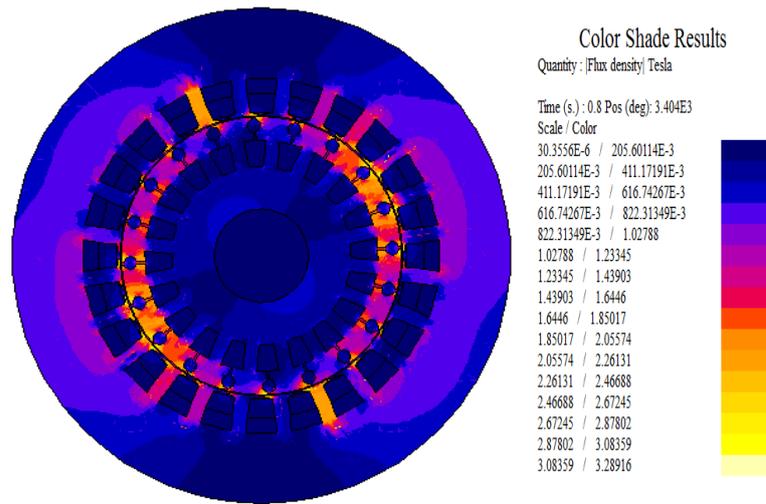


Figure. IV.73. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.8(s)

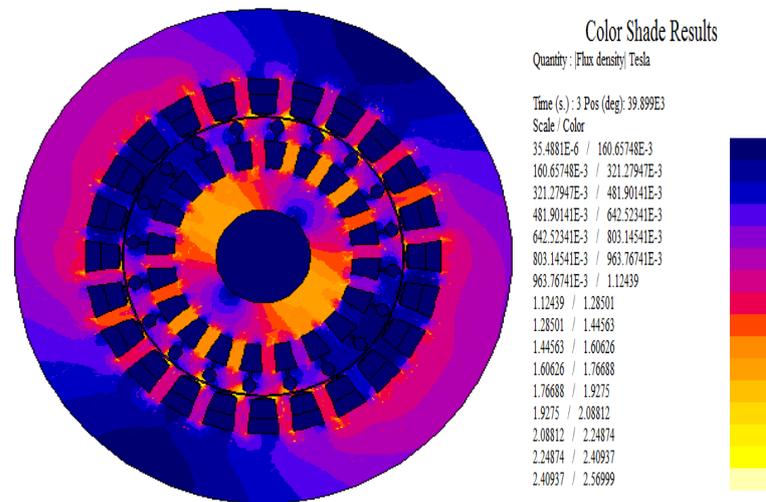


Figure. IV.74. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 3 (s)

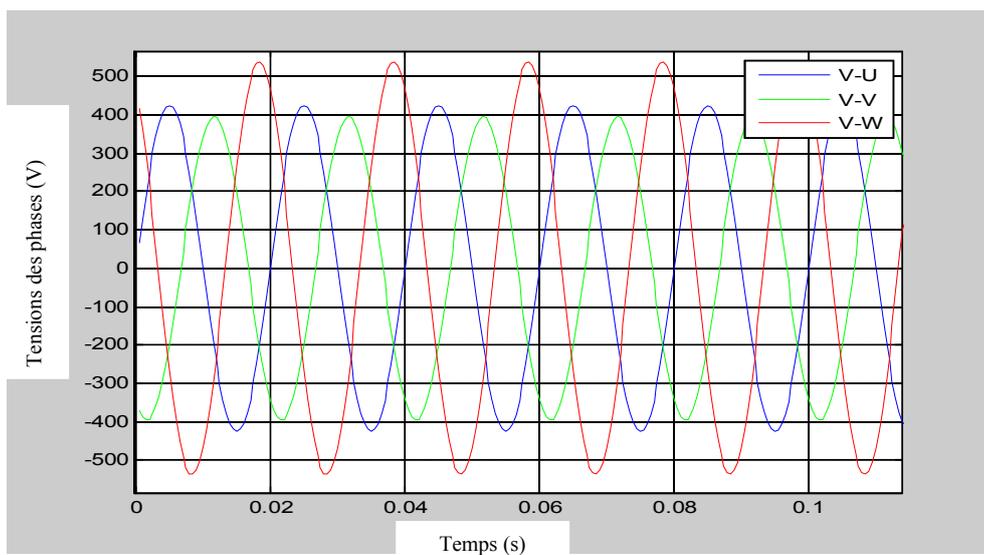


Figure. IV.75. Forme d'onde de la tension phase V\_U, phase V\_V, V\_W

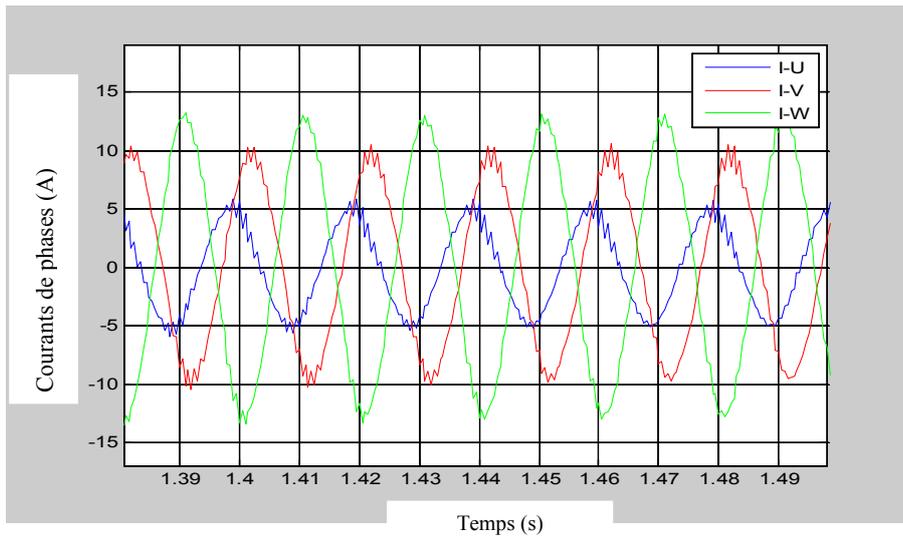


Figure. IV.76. Forme d'onde des courants des phases V\_U, phase V\_V, V\_W

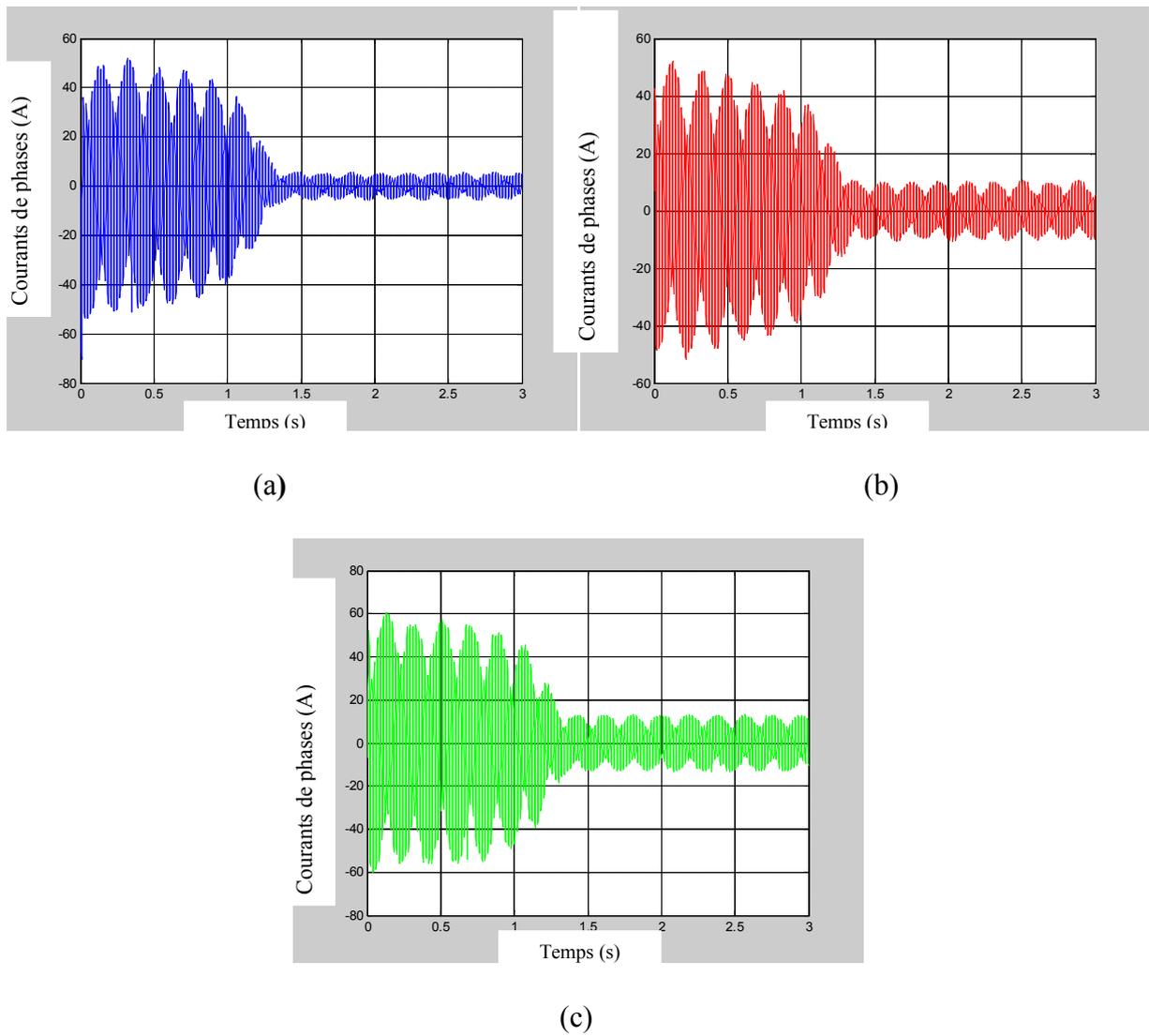


Figure. IV.77. Forme d'onde du courant statorique :  
 (a) phase V\_U, (b) phase V\_V, (c) V\_W

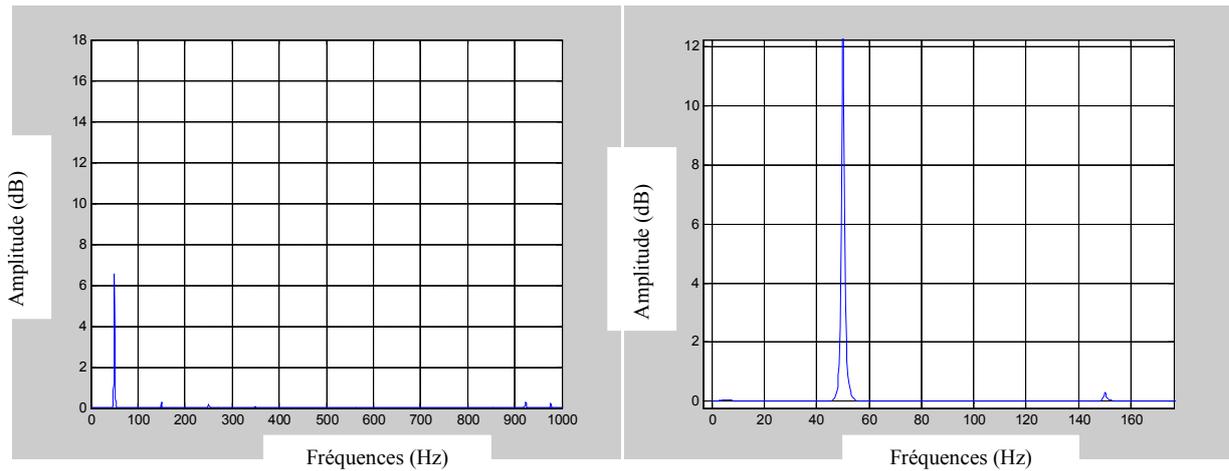


Figure. IV.78. Spectre (avec zoom) du courant statorique phase V\_U.

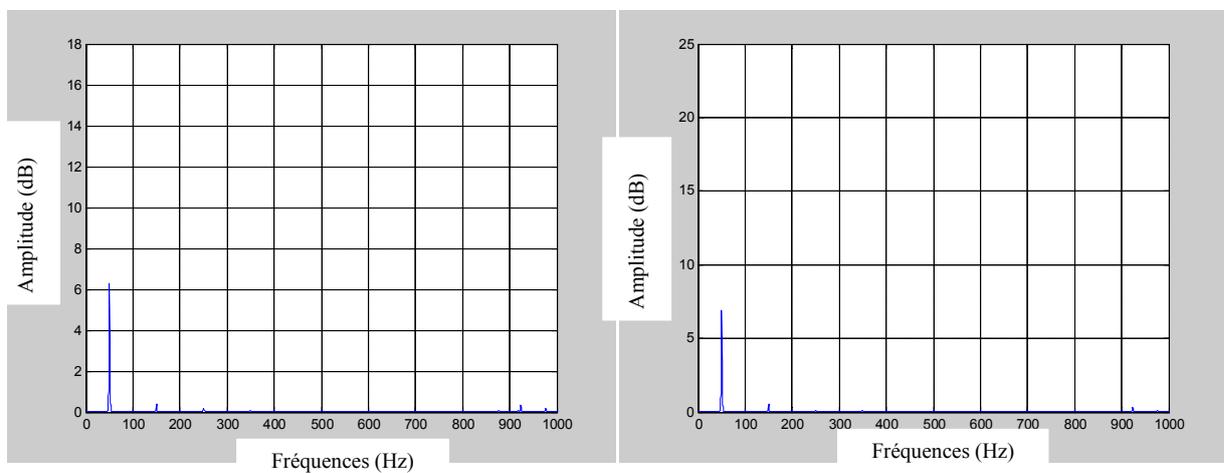


Figure. IV.79. Spectre (avec zoom) du courant statorique phase V\_V et phase V\_W.

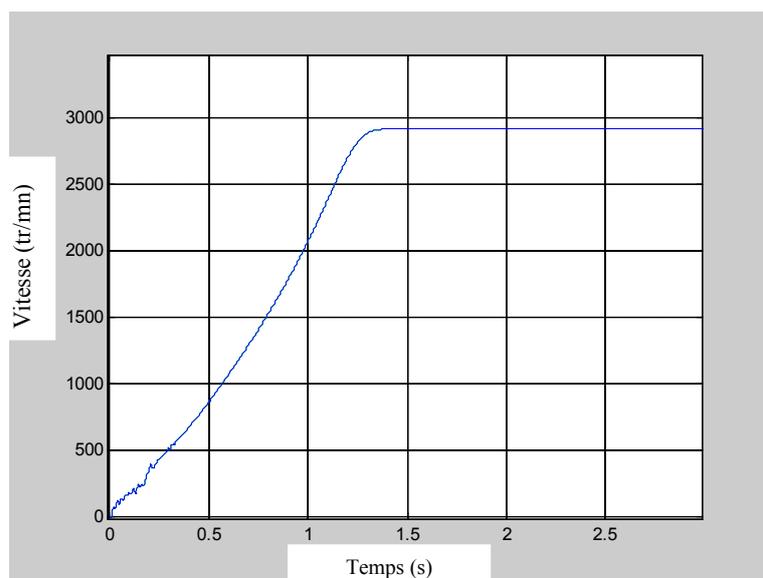


Figure. IV.80. Vitesse de rotation de la machine.

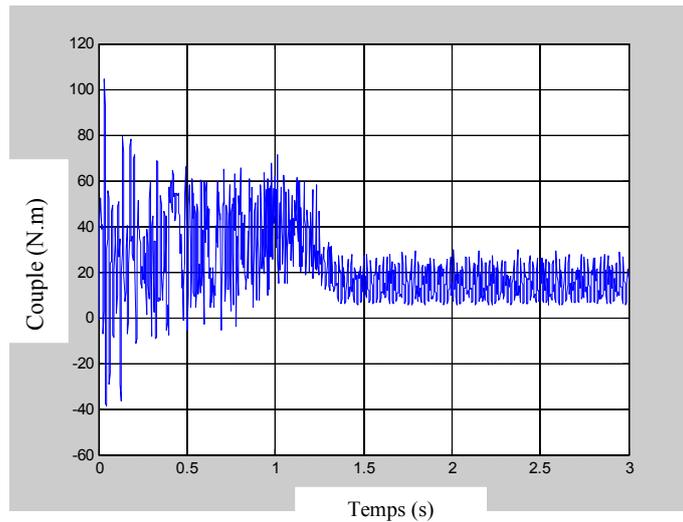


Figure. IV.81. Couple électromagnétique de la machine.

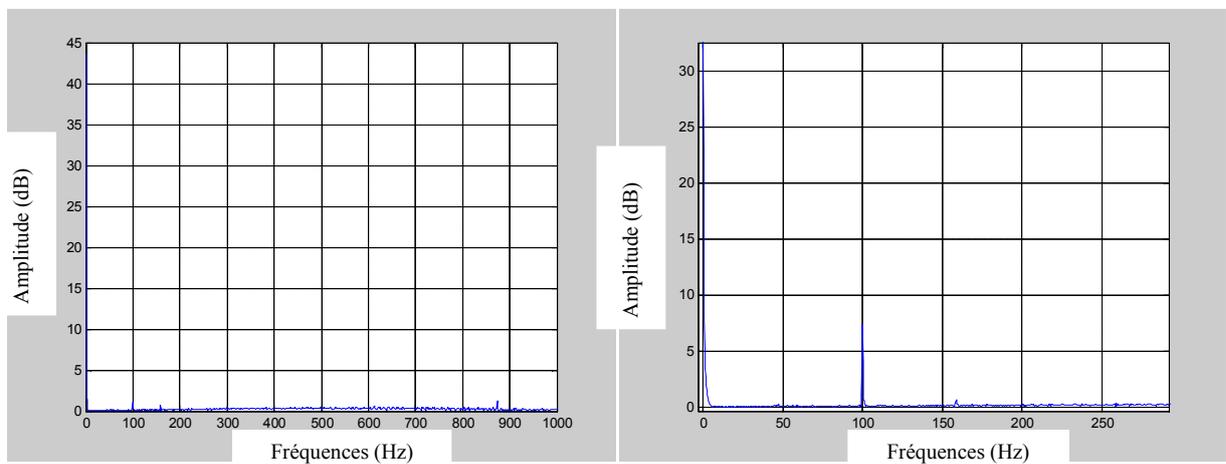


Figure. IV.82. Spectre du Couple électromagnétique (avec zoom) de la machine.

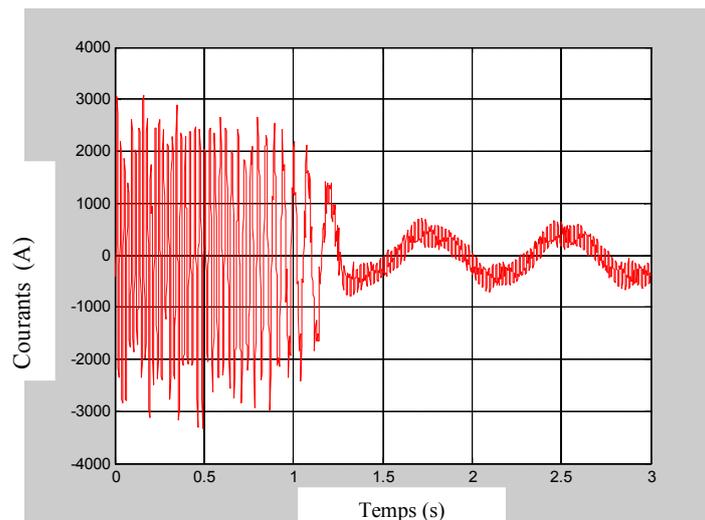


Figure. IV.83. Le courant d'une barre saine (5).

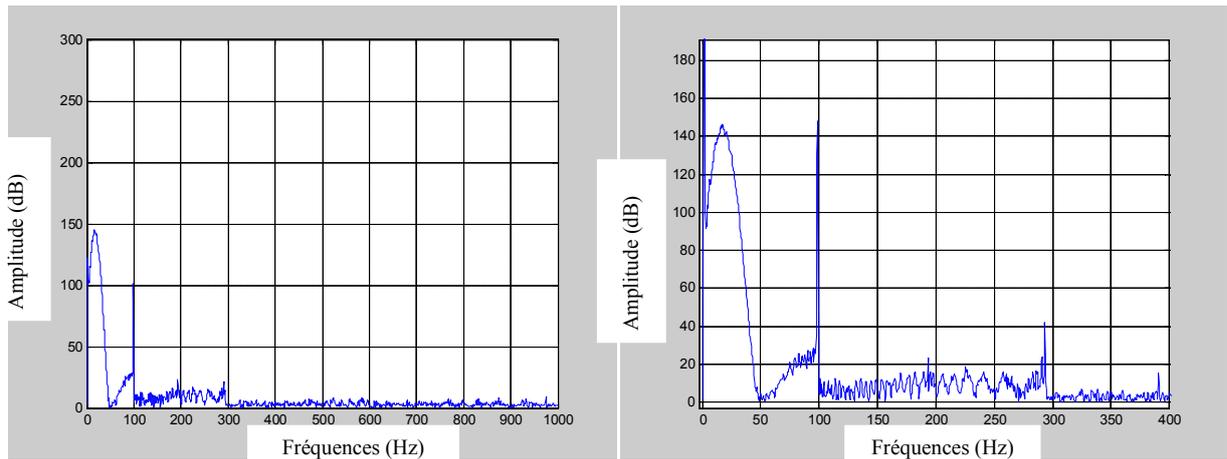


Figure. IV.84. Spectre (avec zoom) du courant d'une barre saine (5).

### IV.3.3 Cas du trois phase déséquilibrée

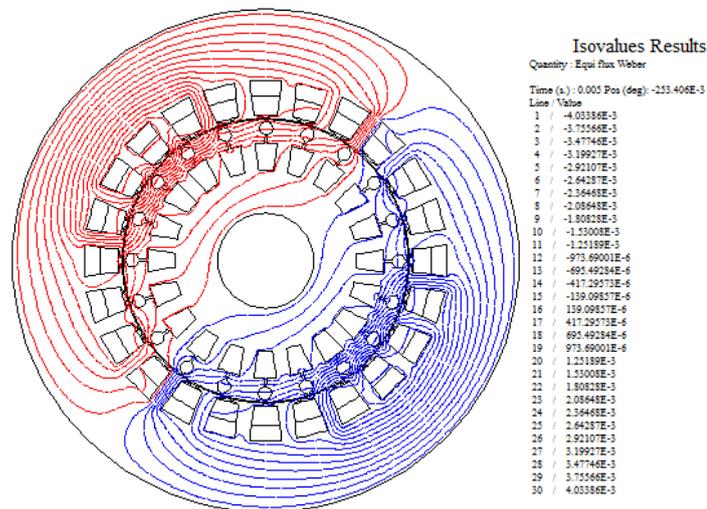


Figure. IV.85. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.005 (s).

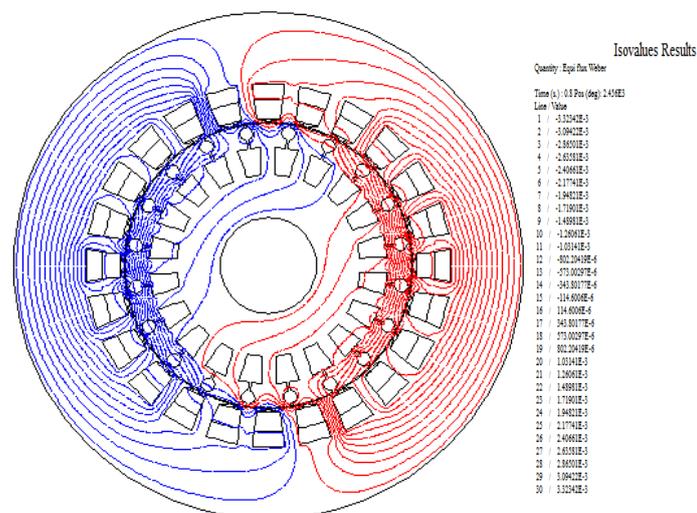


Figure. IV.86. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.8 (s).

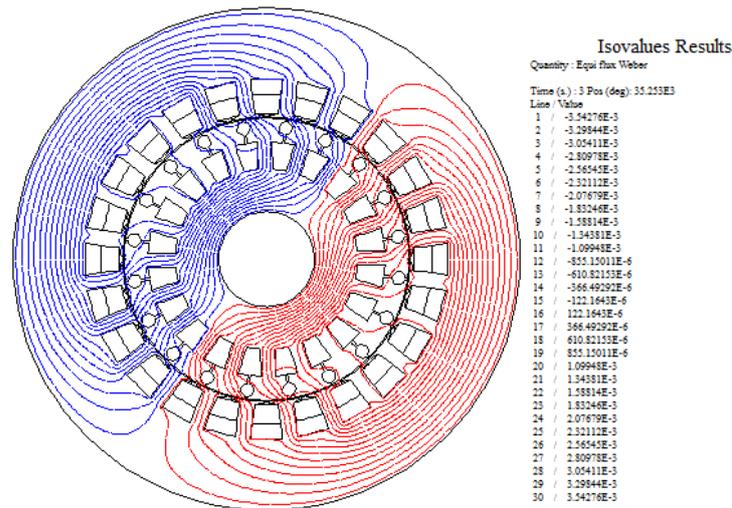


Figure. IV.87. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 3 (s).

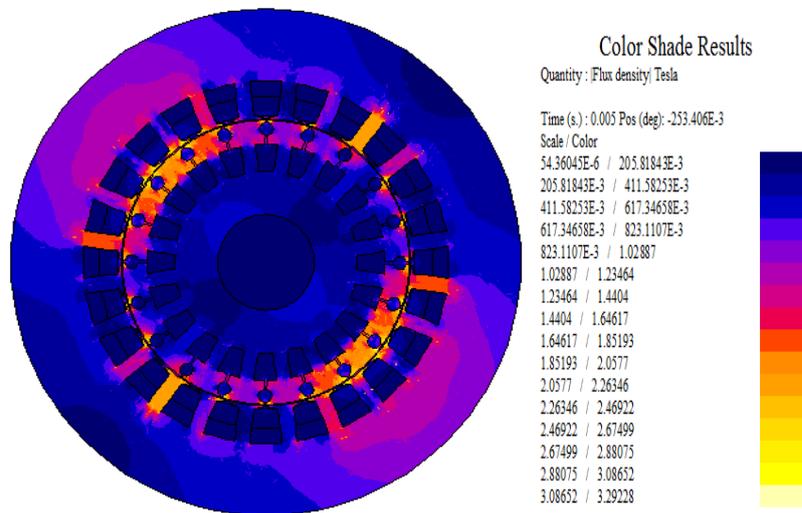


Figure. IV.88. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.005(s)

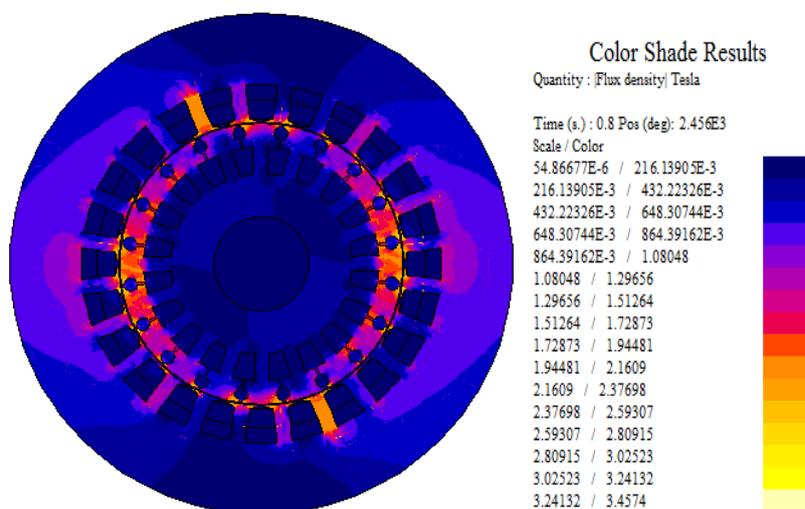


Figure. IV.89. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.8(s)

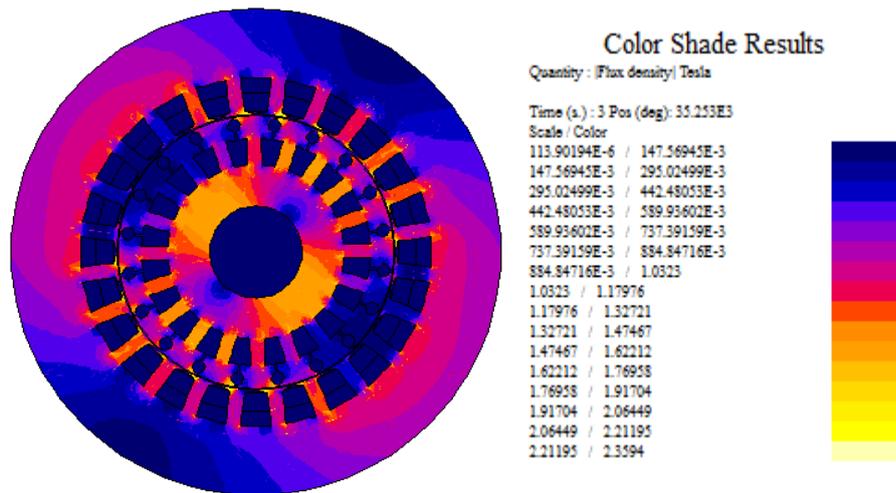


Figure. IV.90. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 3(s)

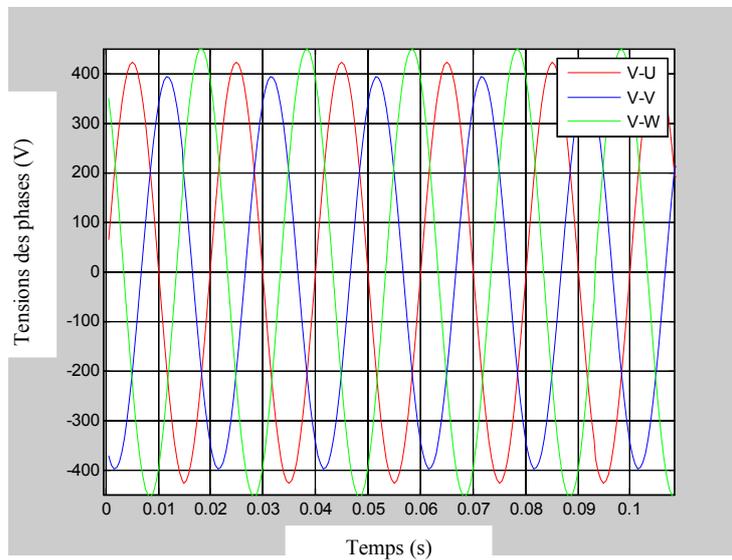


Figure. IV.91. Forme d'onde de la tension phase V\_U, phase V\_V, V\_W

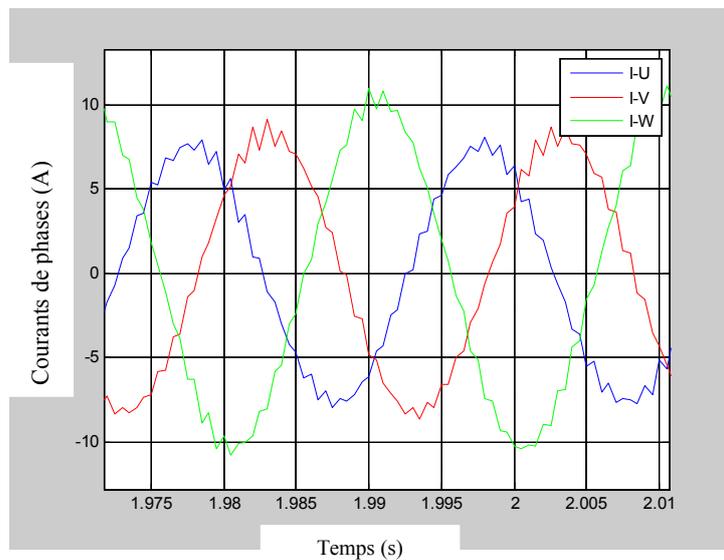


Figure. IV.92. Forme d'onde du courant statorique phase V\_U, phase V\_V, phase V\_W

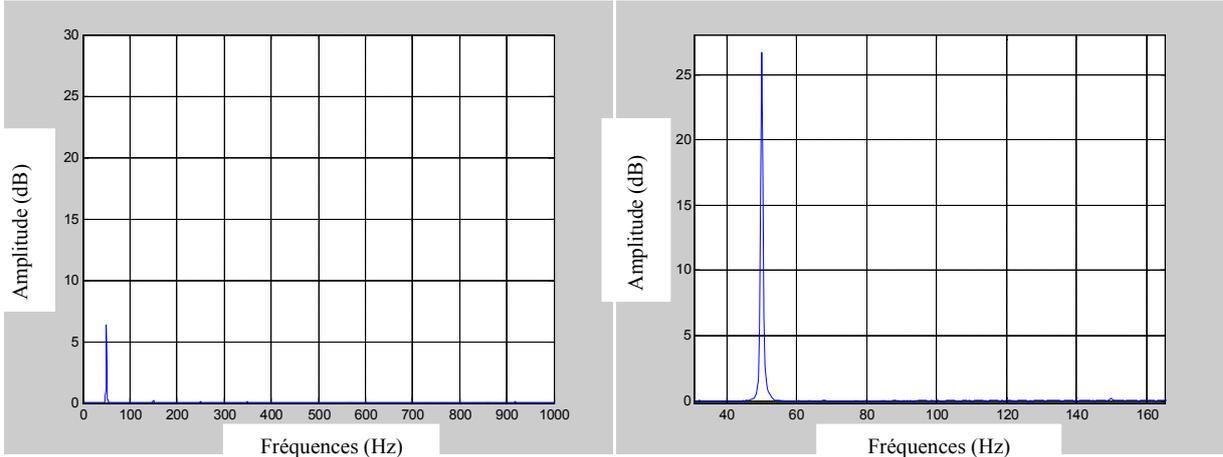


Figure. IV.93. Spectre (avec zoom) du courant statorique phase V\_U.

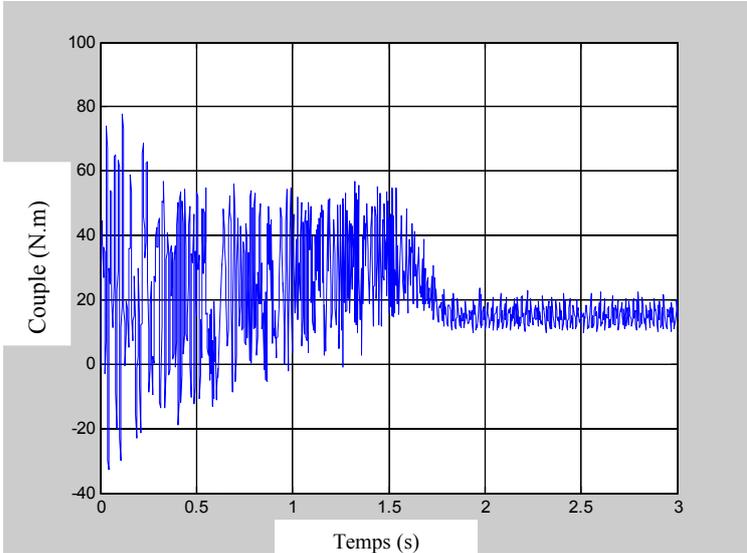


Figure. IV.94. Couple électromagnétique de la machine.

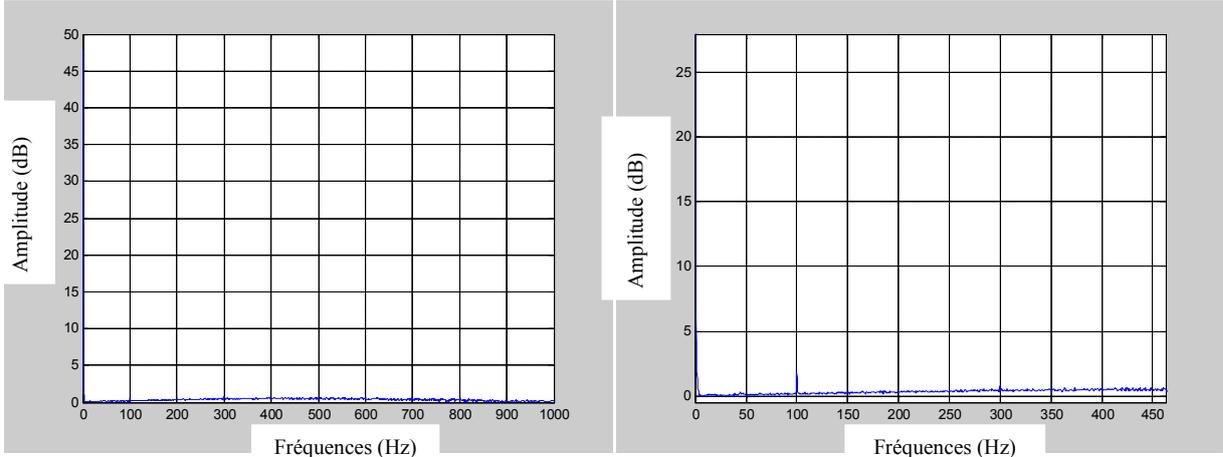


Figure. IV.95. Spectre du Couple électromagnétique (avec zoom) de la machine.

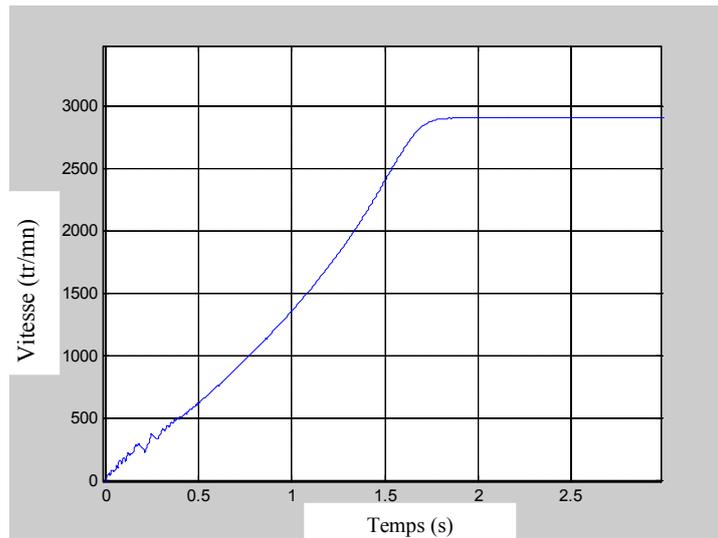


Figure. IV.96. Vitesse de rotation de la machine.

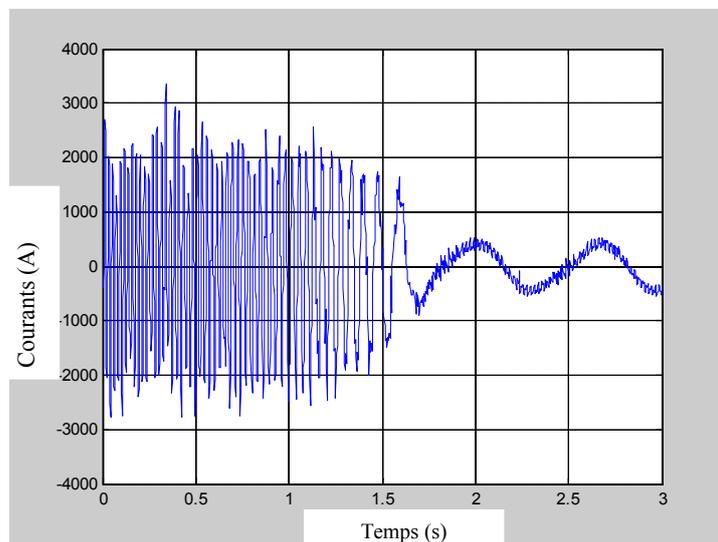


Figure. IV.97. Le courant d'une barre (5).

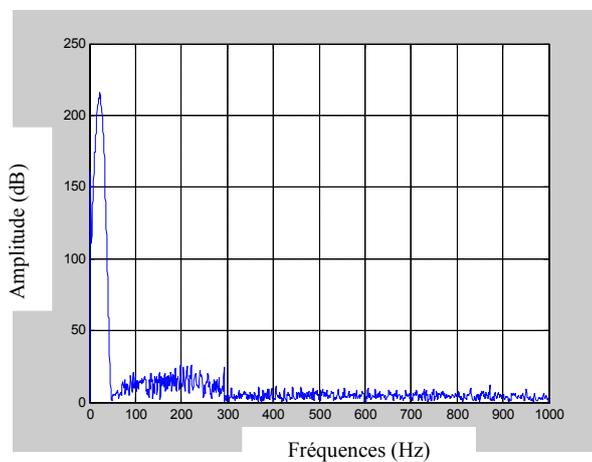


Figure. IV.98. Spectre (avec zoom) du courant d'une barre (5).

IV.4 Modélisation de la machine AS à cage avec défaut de déséquilibre d'alimentation et défaut de cassure de barres.

IV.4.1 Cas de cassure d'une seule barre avec une tension déséquilibrée

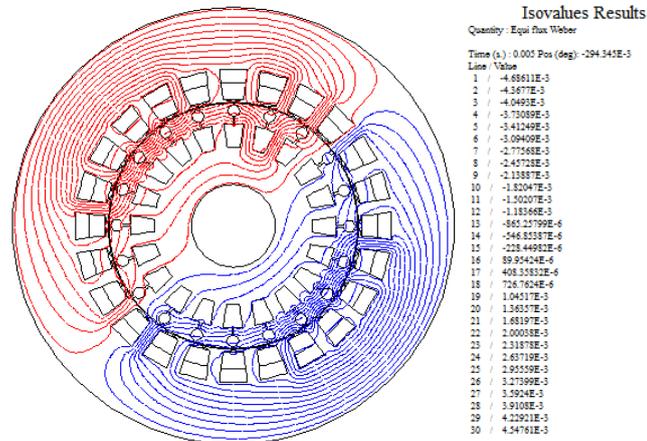


Figure. IV.99. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.005 (s).

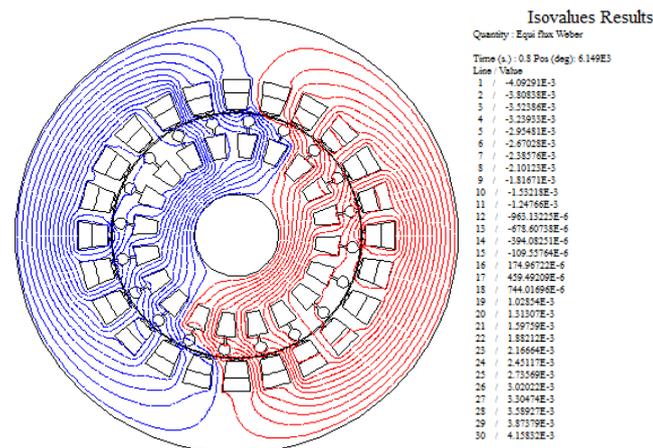


Figure. IV.100. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.8 (s).

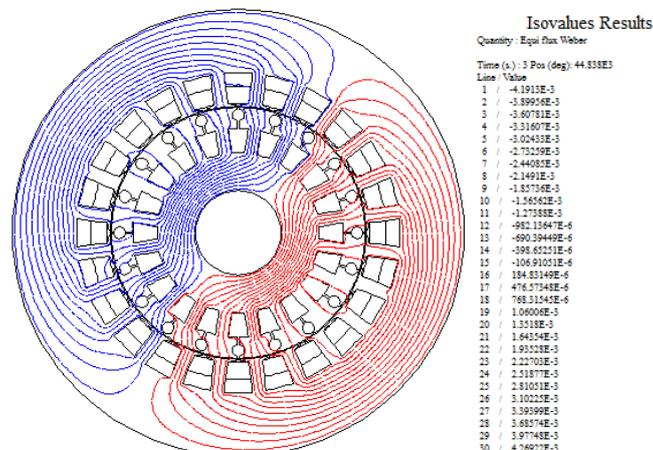


Figure. IV.101. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 3 (s).

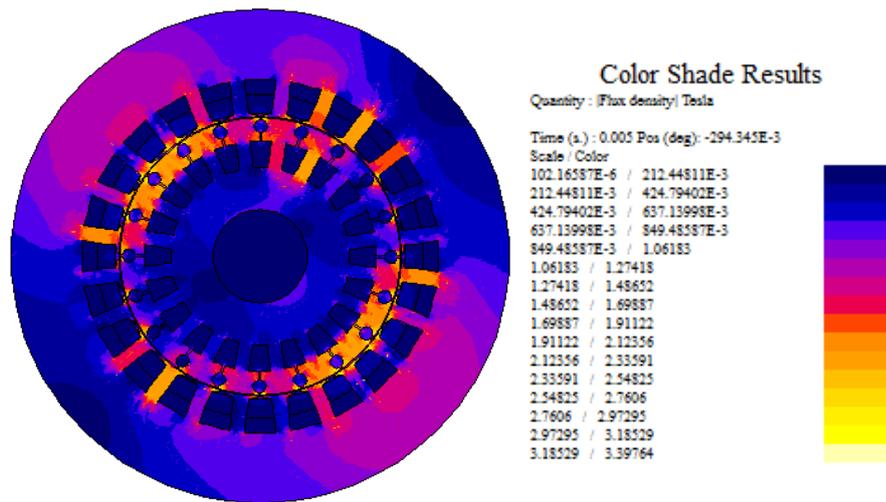


Figure. IV.102. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.005(s)

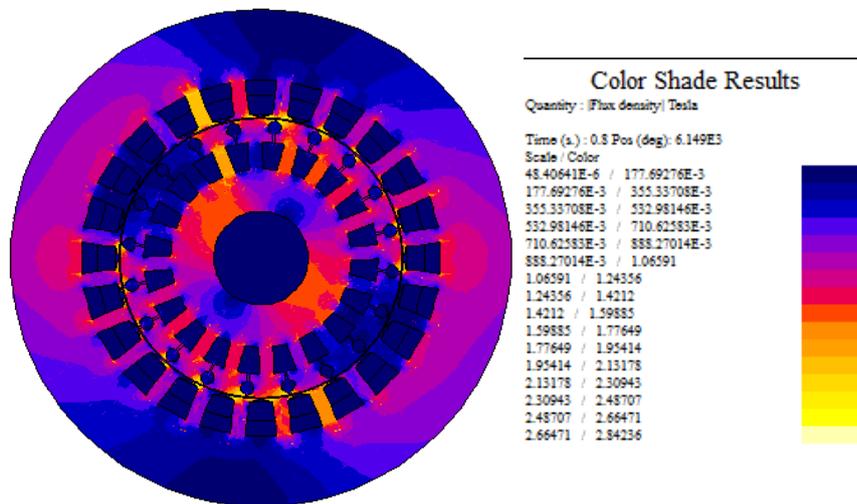


Figure. IV.103. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.8(s)

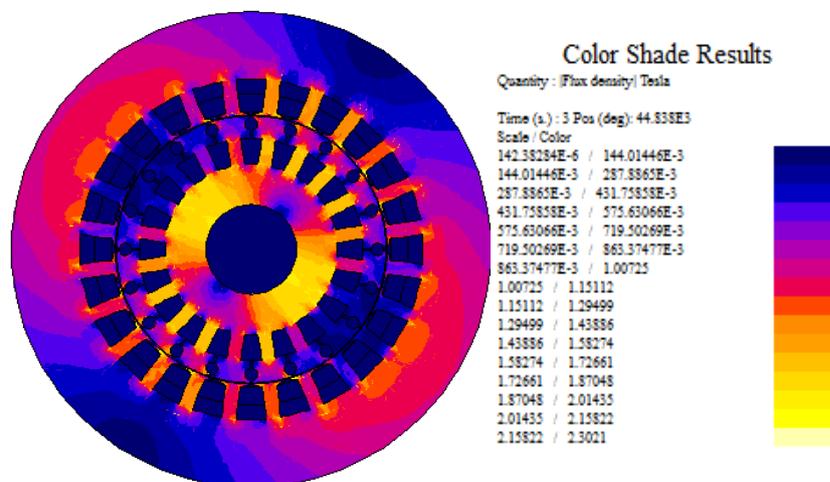


Figure. IV.104. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 3 (s)

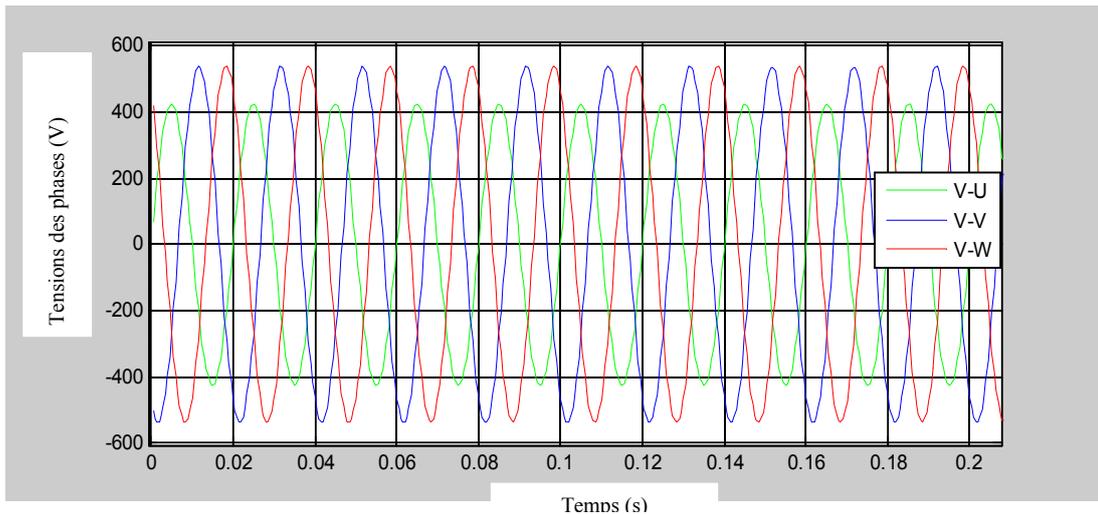


Figure. IV.105. Forme d'onde de la tension phase (V\_U déséquilibrée), phase V\_V, V\_W

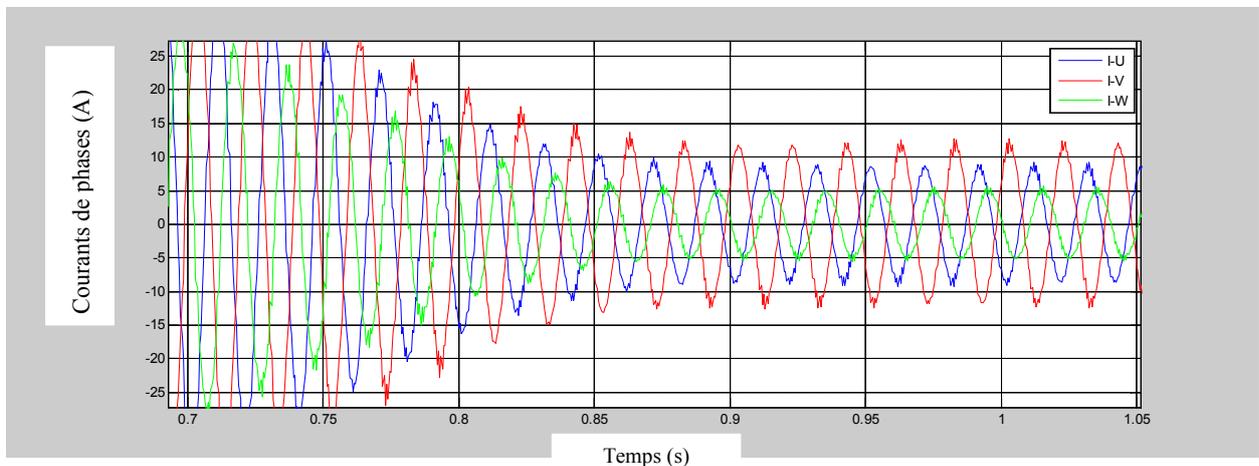


Figure. IV.106. Forme d'onde du courant statorique (phase V\_U déséquilibrée)

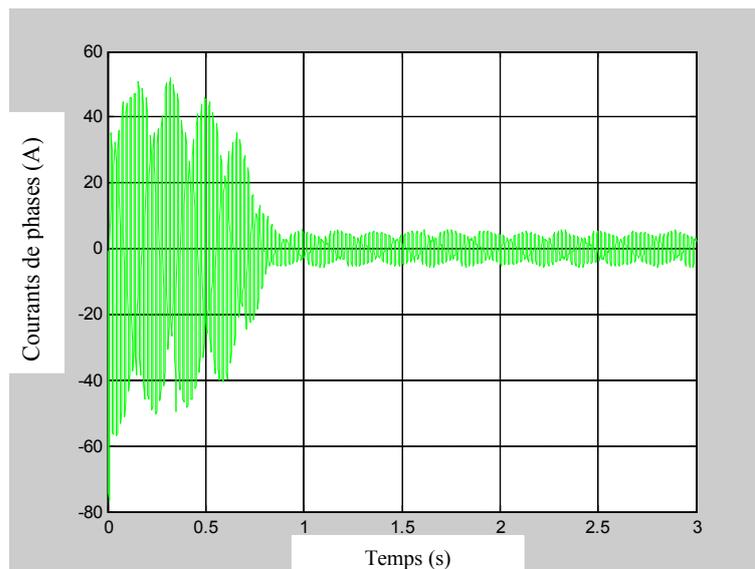


Figure. IV.107. Forme d'onde du courant statorique (phase V\_U déséquilibrée)

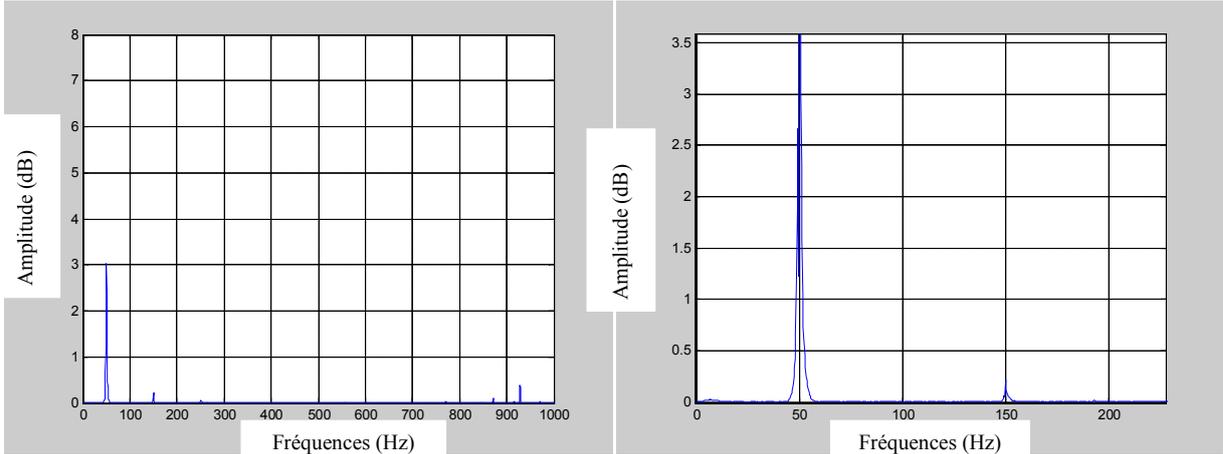


Figure. IV.108.Spectre (avec zoom) du courant statorique d’une phase.

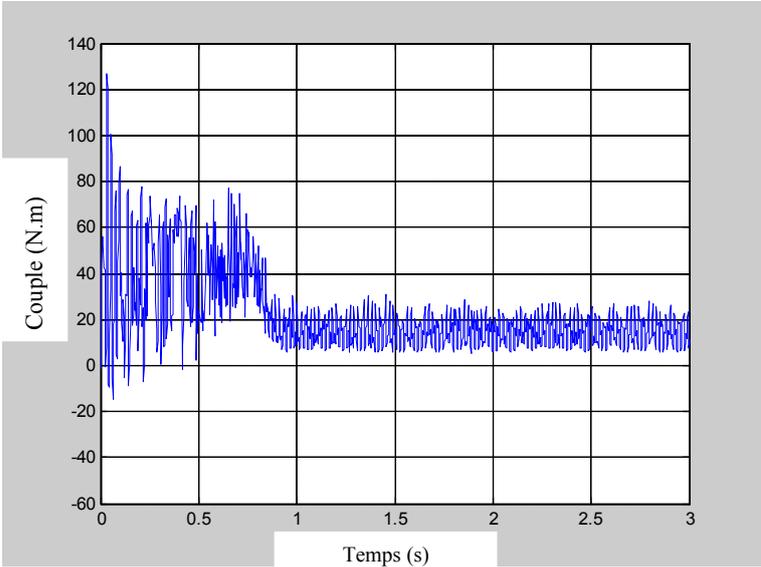


Figure. IV.109.Couple électromagnétique de la machine.

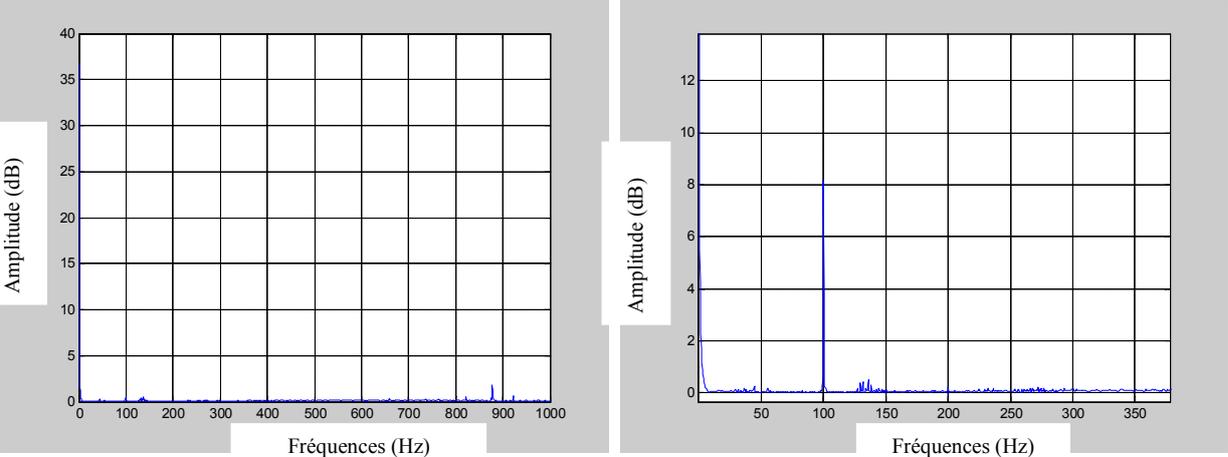


Figure. IV.110.Spectre du Couple électromagnétique (avec zoom) de la machine.

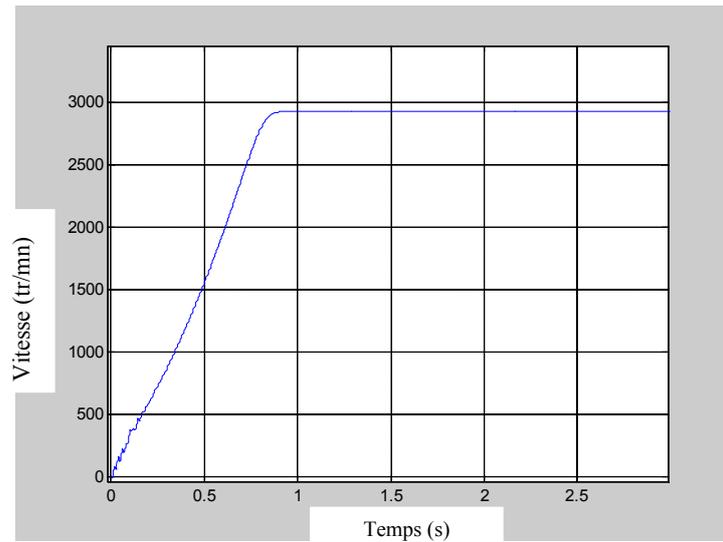


Figure. IV.111. Vitesse de rotation de la machine.

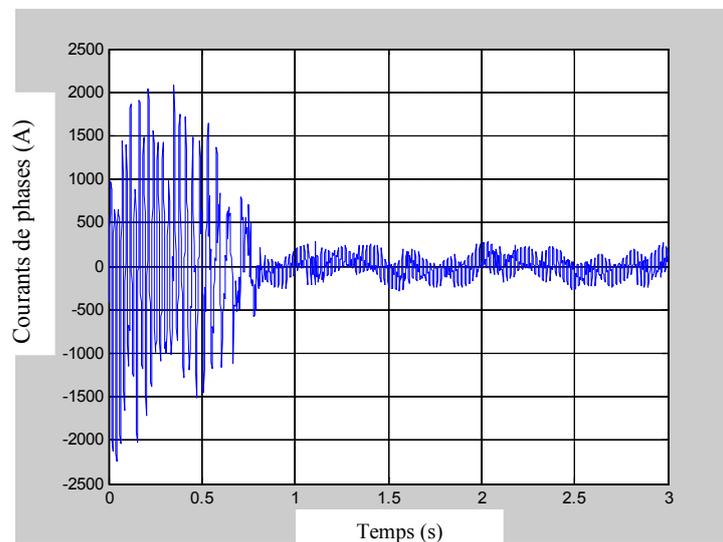


Figure. IV.112. Le courant des barres casse avec une phase  $V_U$  déséquilibrée.

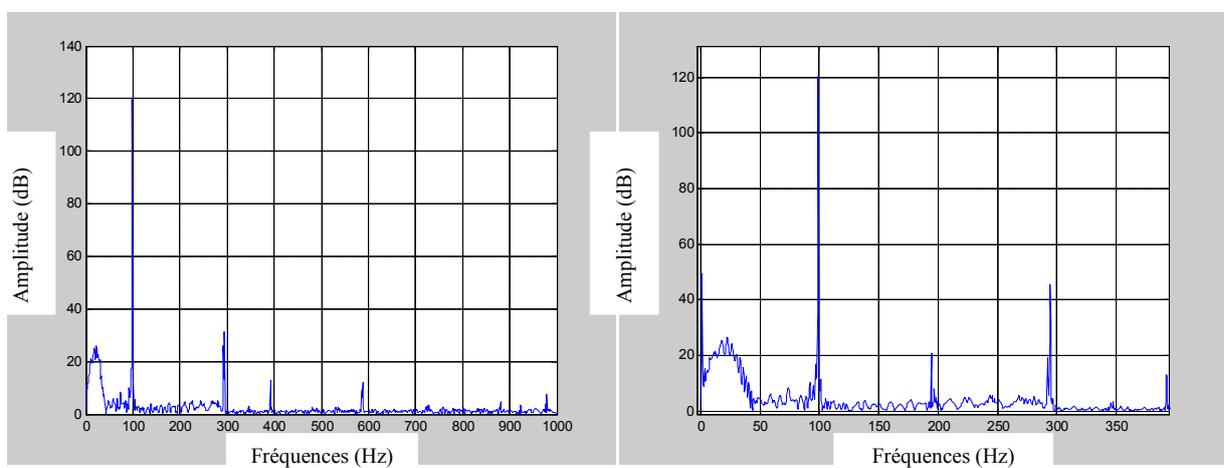


Figure. IV.113. Spectre (avec zoom) du courant d'une barre cassée(5).

IV.4.2 Cas de cassure d'une seule barre avec deux tensions déséquilibrées

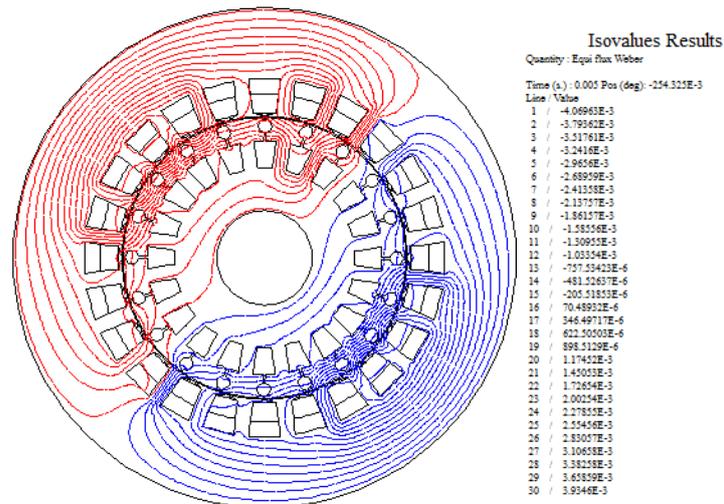


Figure. IV.114. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.005 (s).

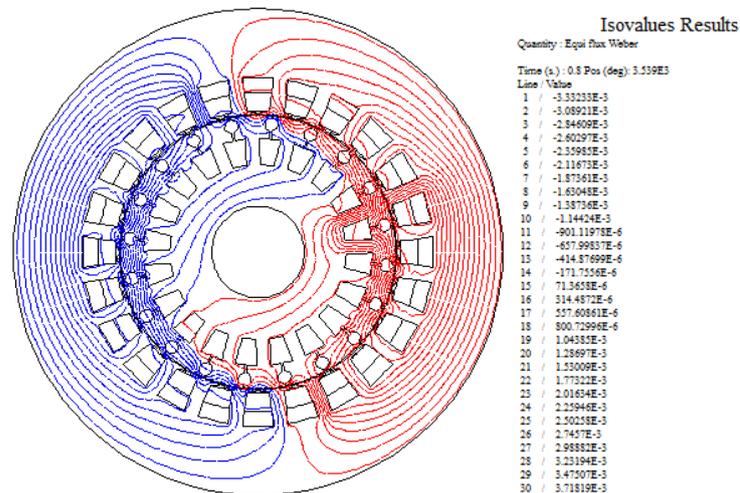


Figure. IV.115. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.8 (s).

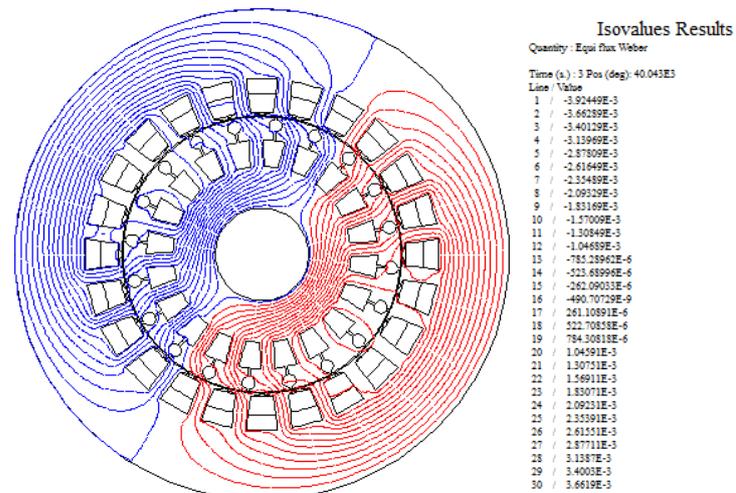


Figure. IV.116. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 3 (s).

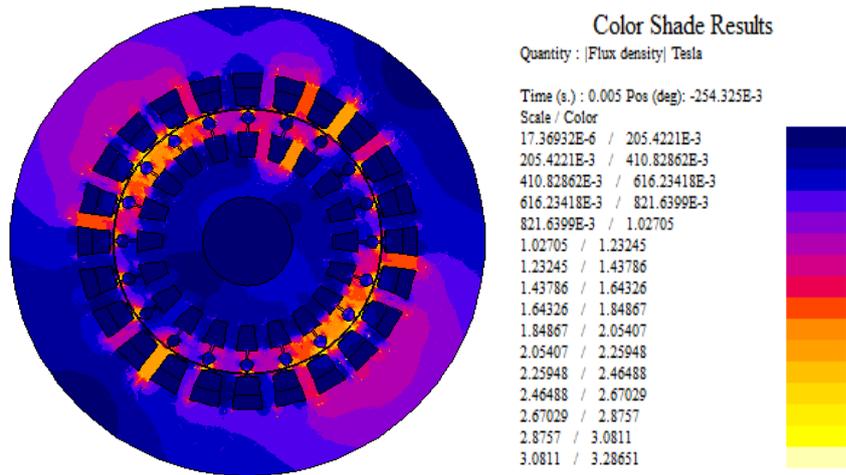


Figure. IV.117. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.005(s)

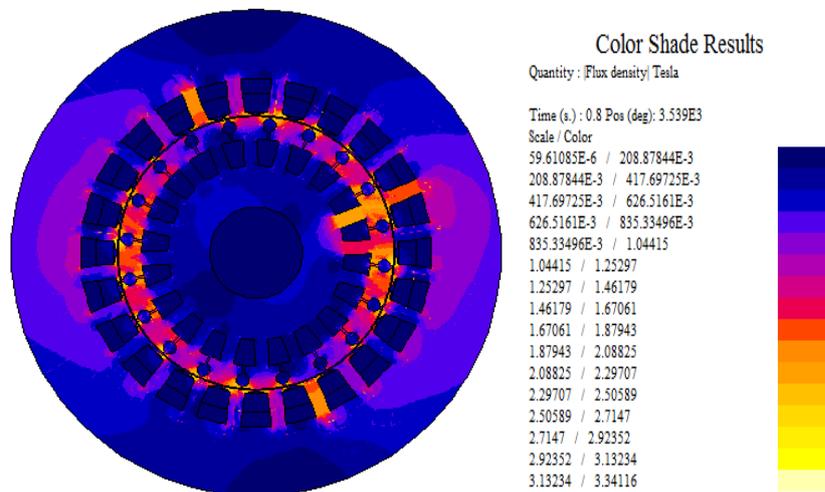


Figure. IV.118. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.8(s)

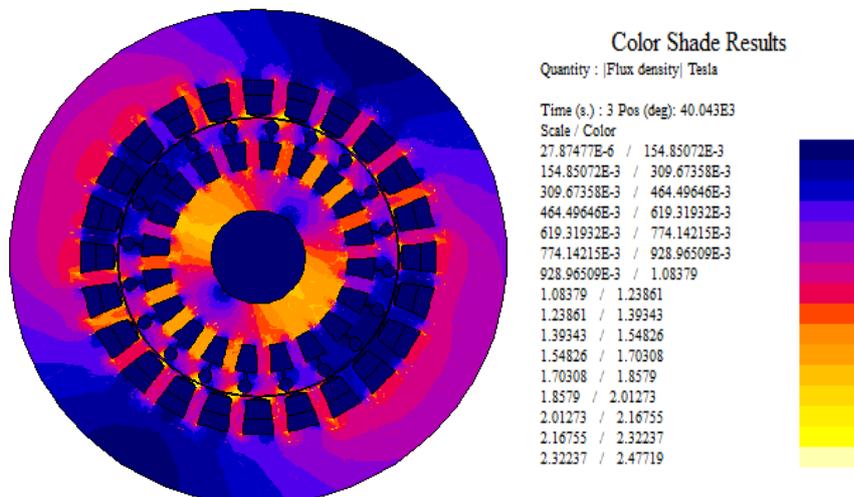


Figure. IV.119. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 3(s)

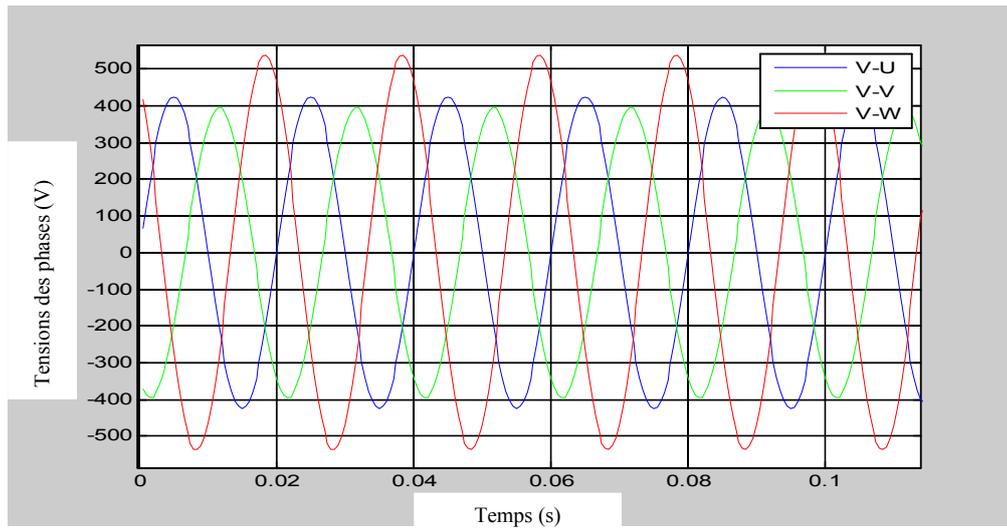


Figure. IV.120. Forme d'onde de la tension phase (V\_U et V\_V déséquilibrée), V\_W équilibrée

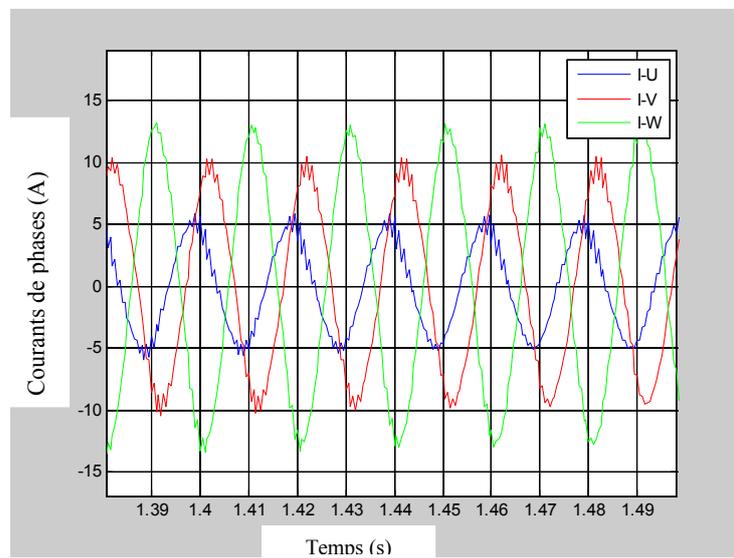
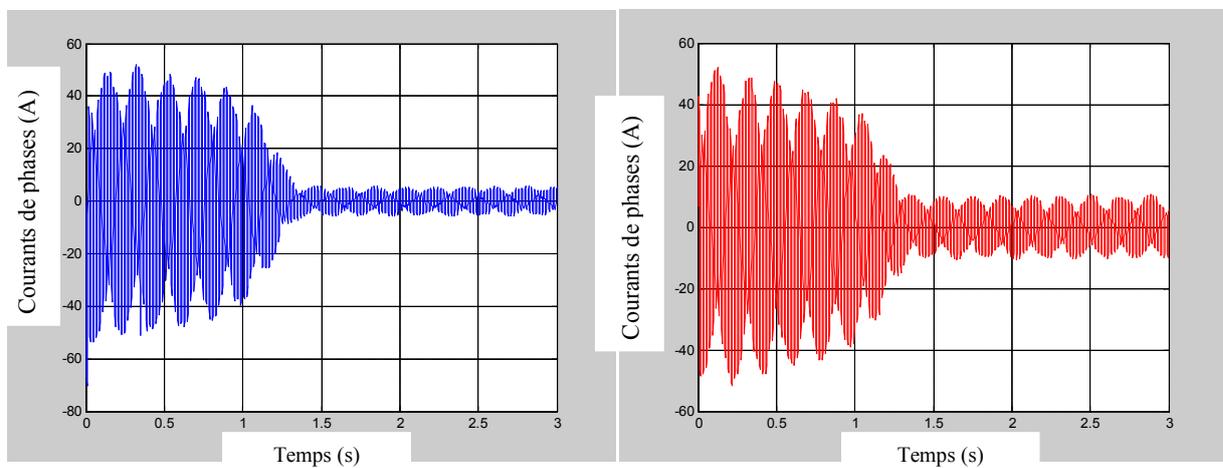
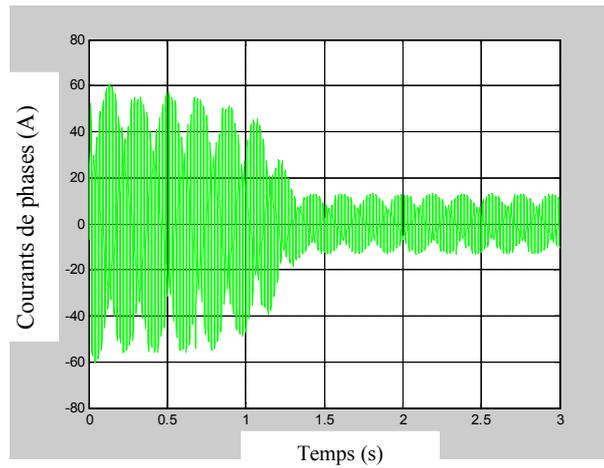


Figure. IV.121. Forme d'onde du courant statorique phase (V\_U et V\_V déséquilibrée) phase V\_W équilibrée



(a)

(b)



(c)

Figure. IV.122. Forme d'onde du courant statorique :

(a) phase V\_U, (b) phase V\_V, (c) V\_W

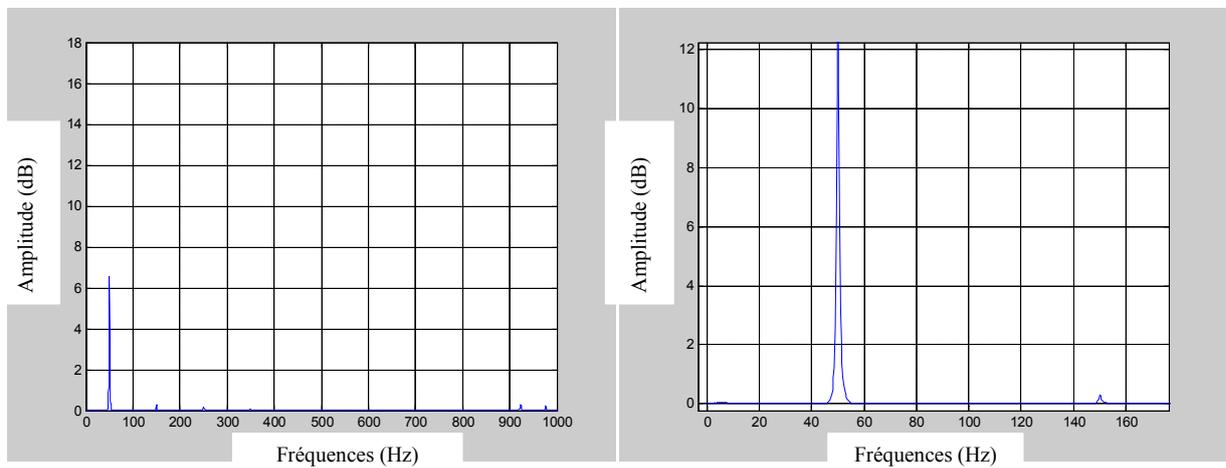


Figure. IV.123. Spectre (avec zoom) du courant statorique phase V\_U.

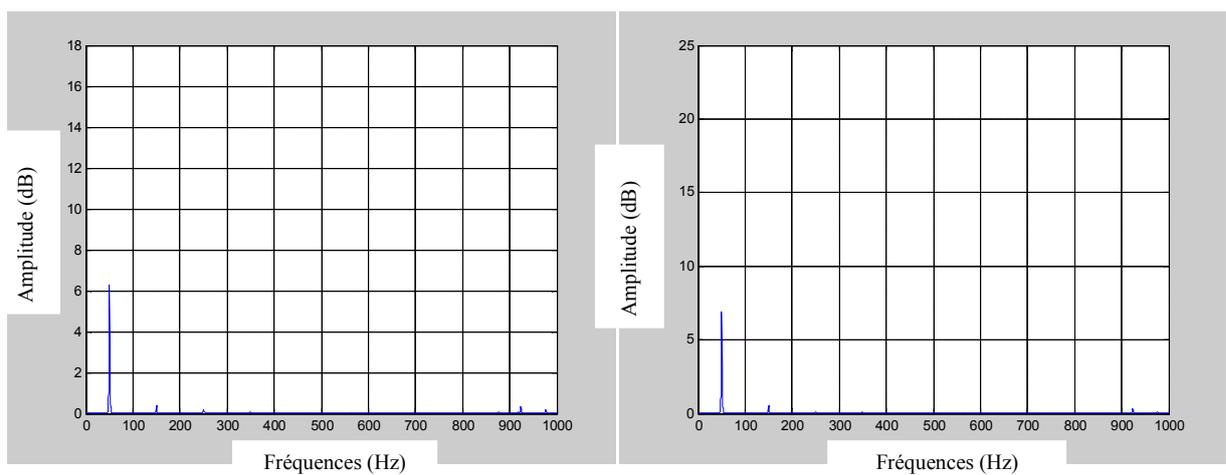


Figure. IV.124. Spectre du courant statorique phase V\_V et phase V\_W.

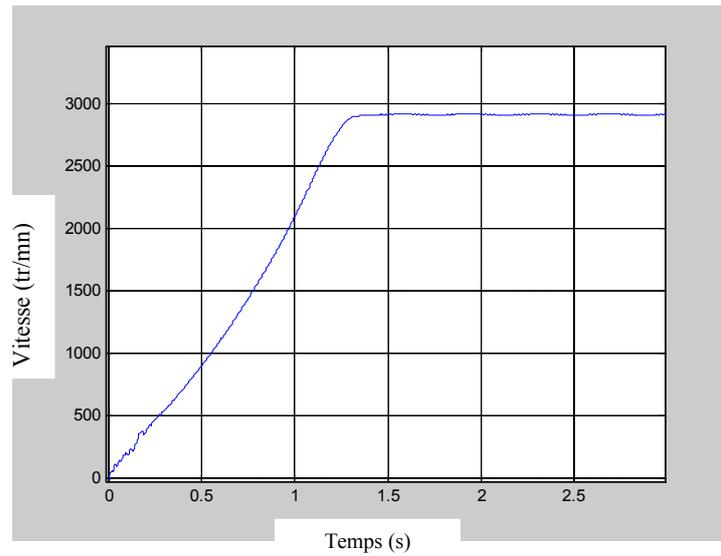


Figure. IV.125.Vitesse de rotation de la machine.

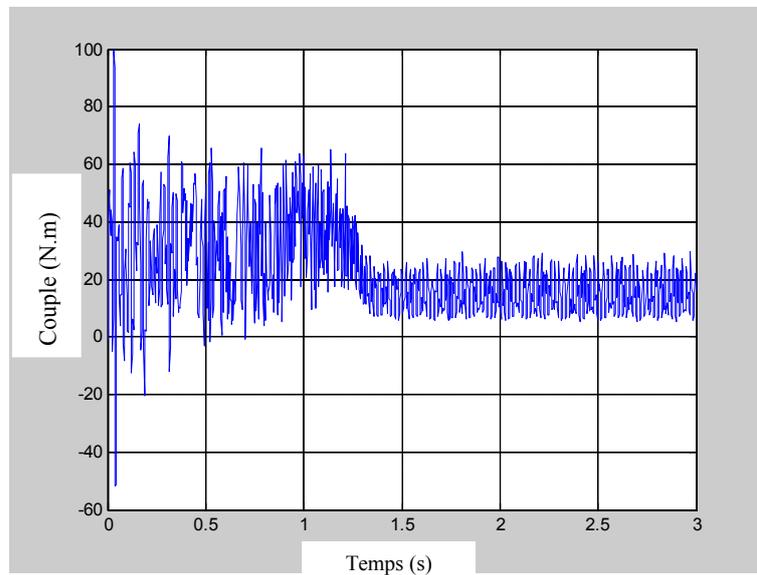


Figure. IV.126.Couple électromagnétique de la machine.

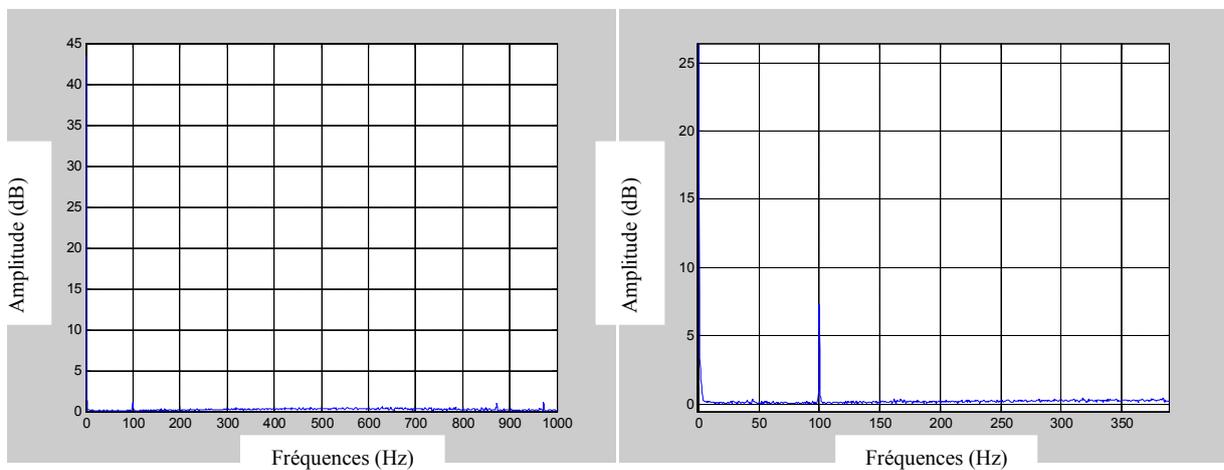


Figure. IV.127.Spectre du Couple électromagnétique (avec zoom) de la machine.

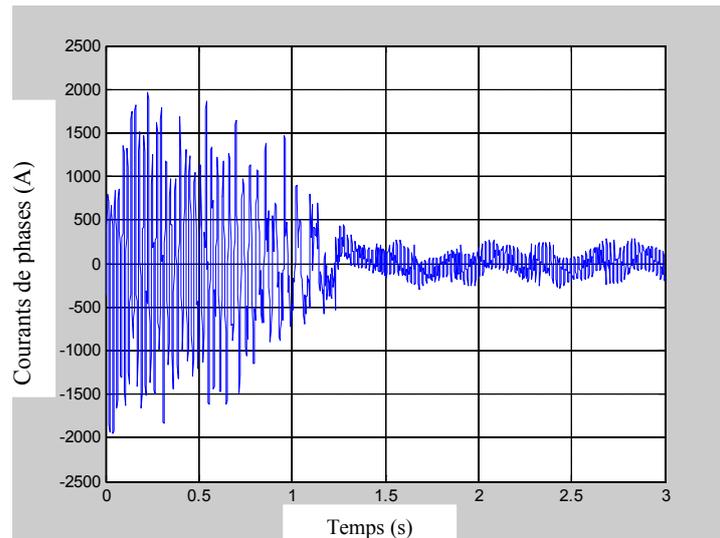


Figure. IV.128. Le courant de barre cassée(5) avec deux phases V<sub>U</sub> et V<sub>V</sub> déséquilibrée.

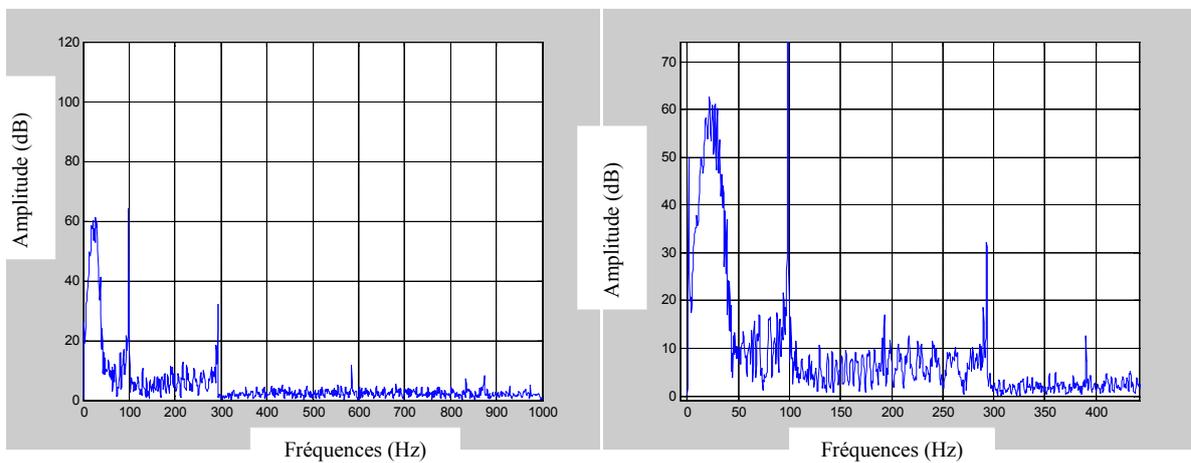


Figure. IV.129. Spectre (avec zoom) du courant d'une barre cassée(5).

### IV.4.3 Cas de cassure d'une seule barre avec trois tensions déséquilibrées

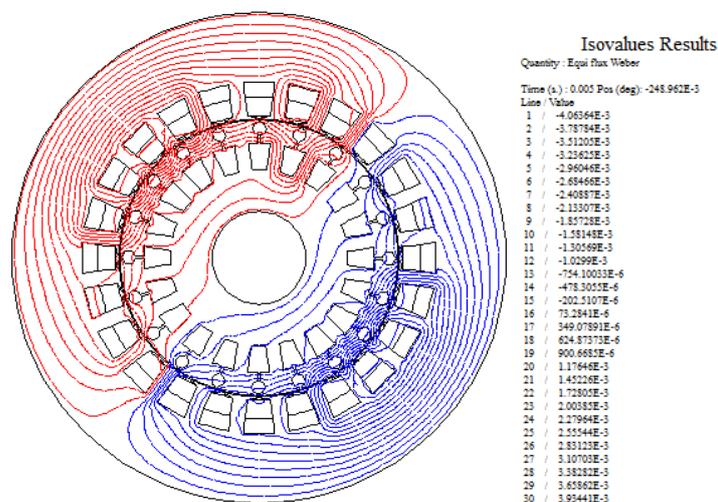


Figure. IV.130. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.005 (s).

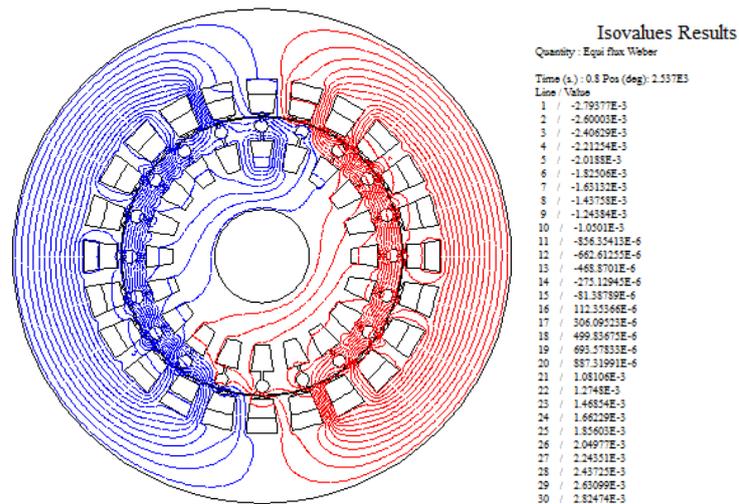


Figure. IV.131. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.8 (s).

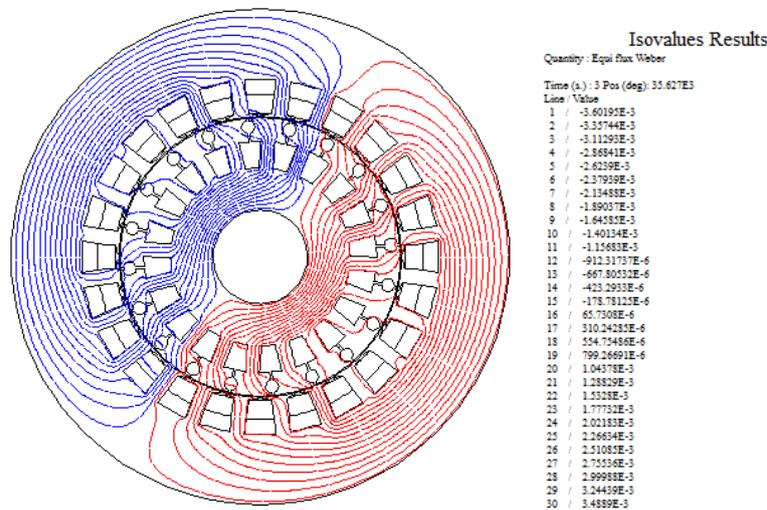


Figure. IV.132. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 3 (s).

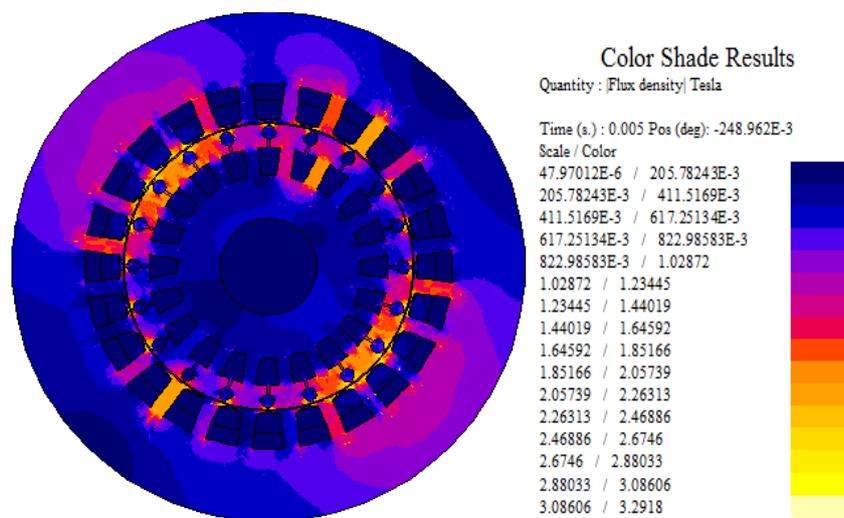


Figure. IV.133. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.005(s)

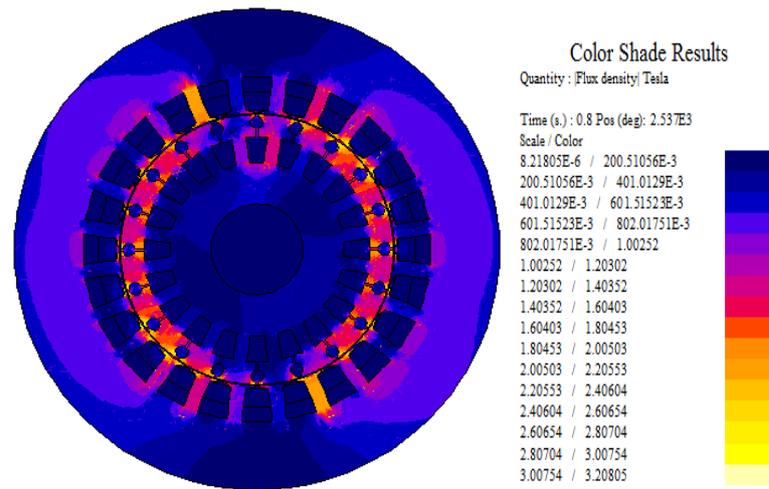


Figure. IV.134. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.8(s)

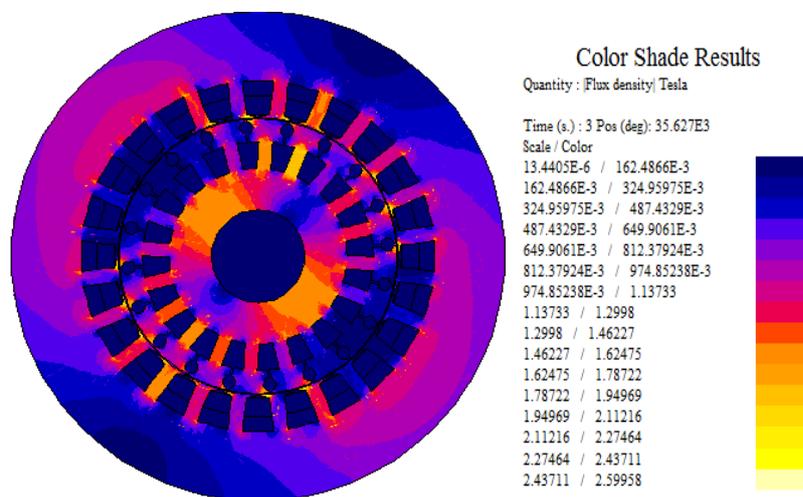


Figure. IV.135. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 3(s)

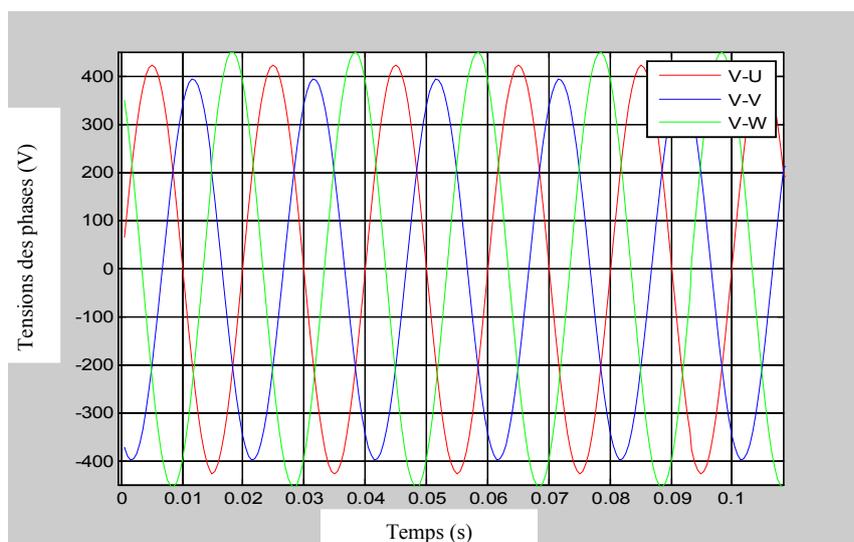


Figure. IV.136. Forme d'onde de la tension phase (V\_U et V\_V, V\_W déséquilibrée)

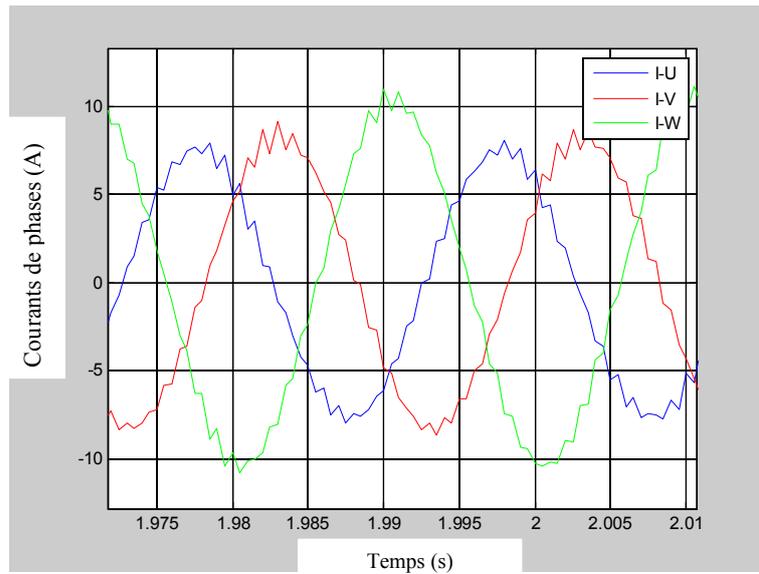


Figure. IV.137. Forme d'onde du courant statorique phase (V\_U et V\_V, V\_W déséquilibrée)

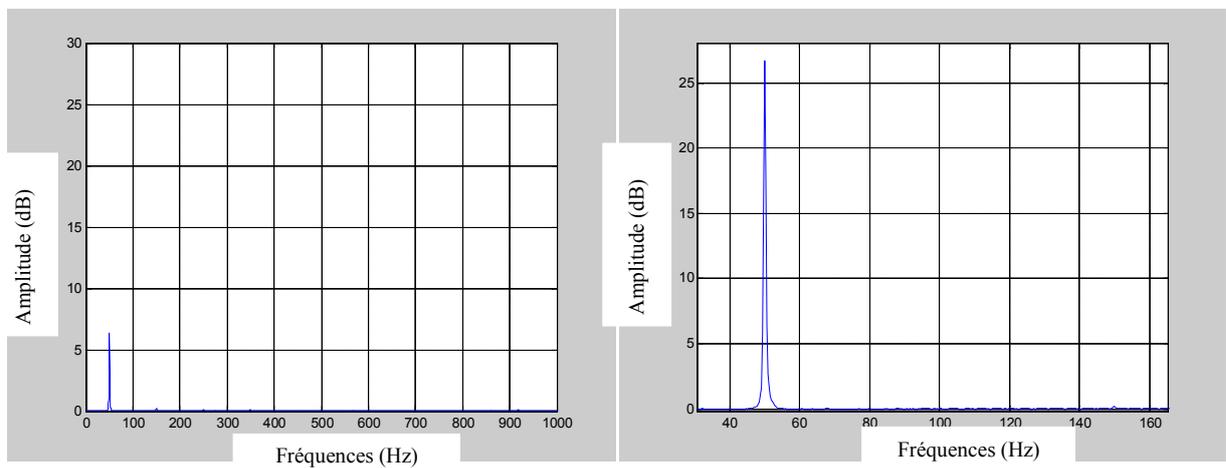


Figure. IV.138. Spectre (avec zoom) du courant statorique phase V\_U.

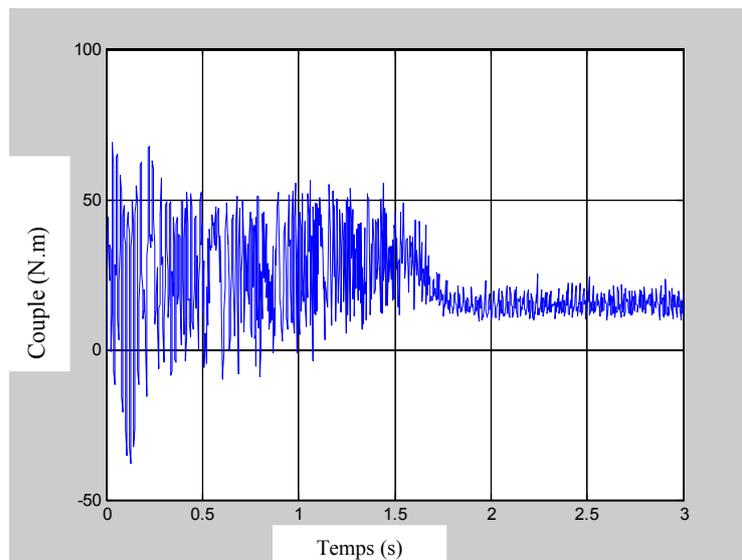


Figure. IV.139. Couple électromagnétique de la machine.

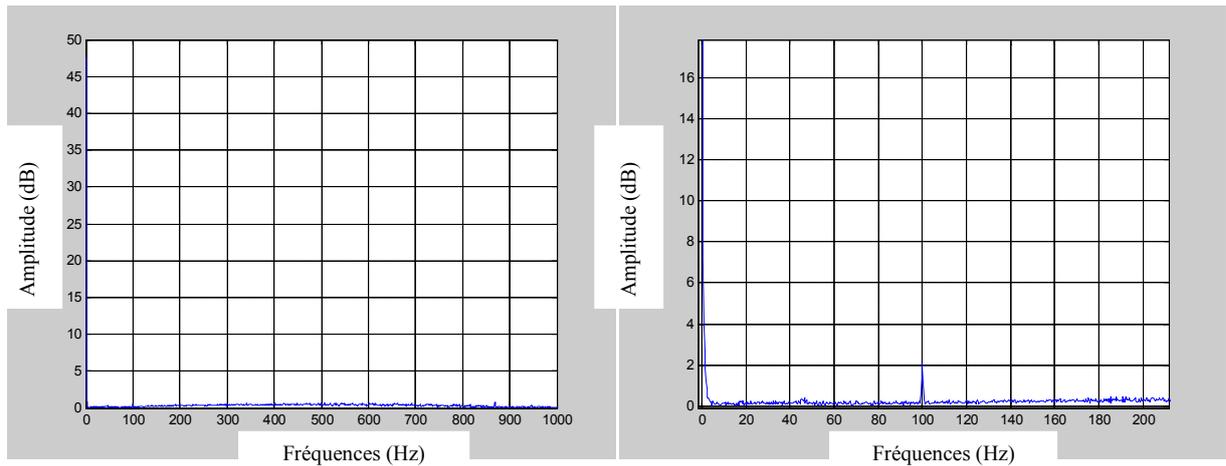


Figure. IV.140. Spectre du Couple électromagnétique (avec zoom) de la machine.

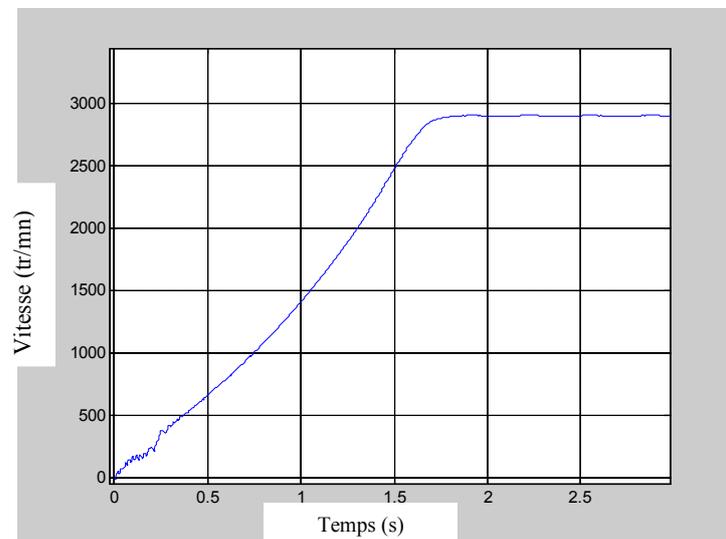


Figure. IV.141. Vitesse de rotation de la machine.

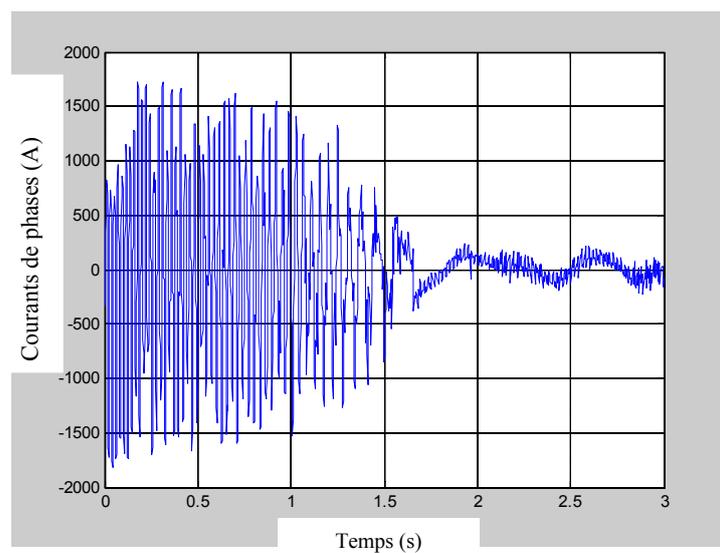


Figure. IV.142. Le courant des barres casse (5) à l'état des trois phases déséquilibrées.

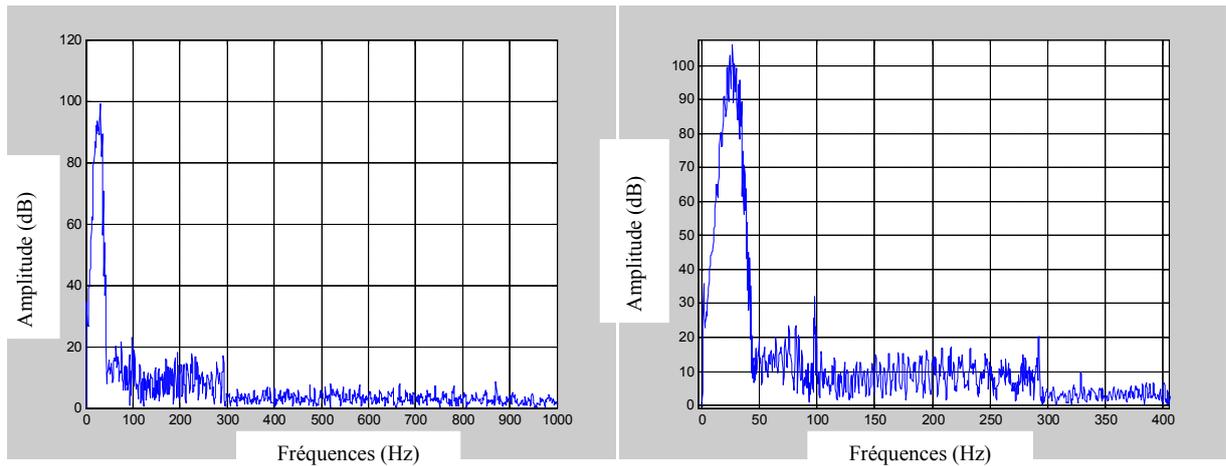


Figure. IV.143. Spectre (avec zoom) du courant d’une barre cassée(5).

#### IV.4.4 Cas de cassure de deux barres avec une tension déséquilibrée

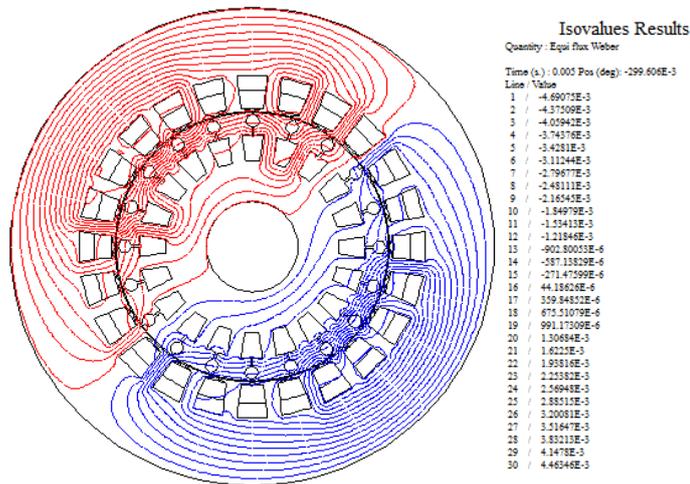


Figure. IV.144. Lignes des flux à l’intérieur et à l’extérieur de la machine à l’instant 0.005 (s).

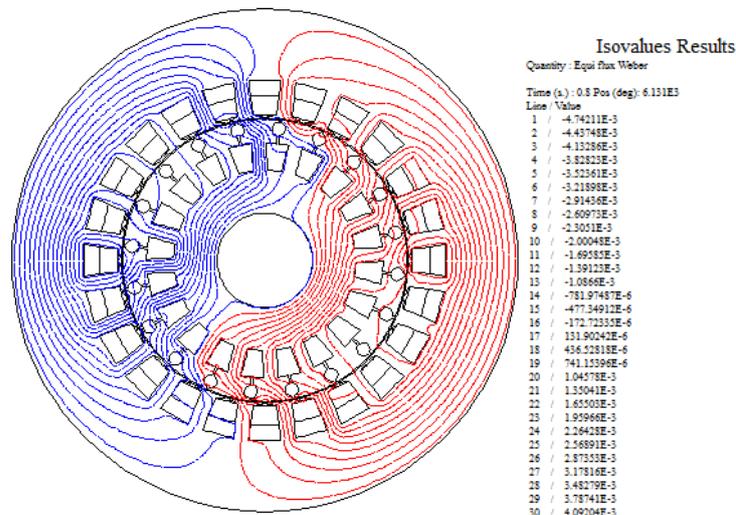


Figure. IV.145. Lignes des flux à l’intérieur et à l’extérieur de la machine à l’instant 0.8 (s).

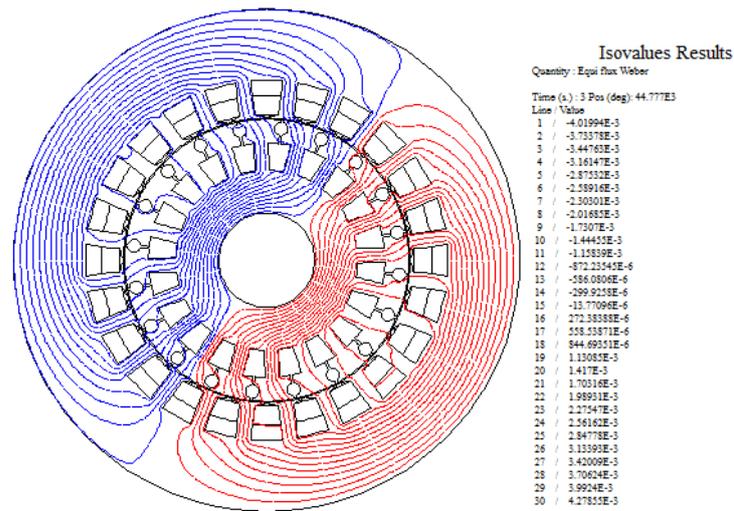


Figure. IV.146. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 3(s).

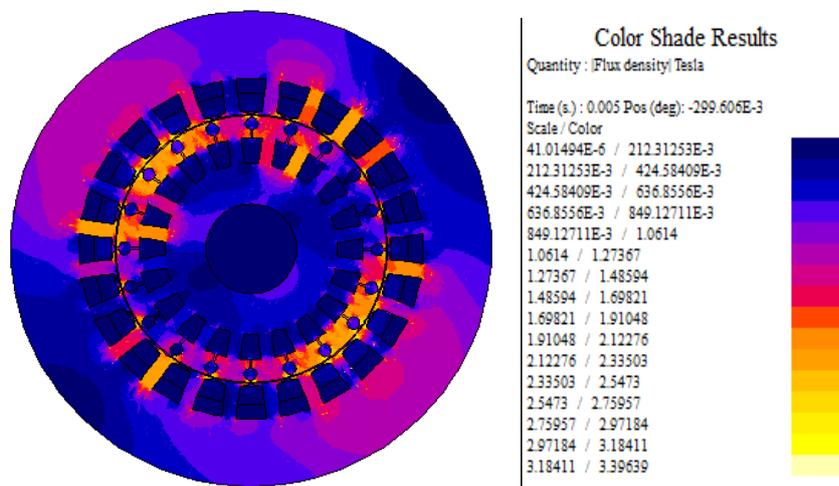


Figure. IV.147. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.005(s)

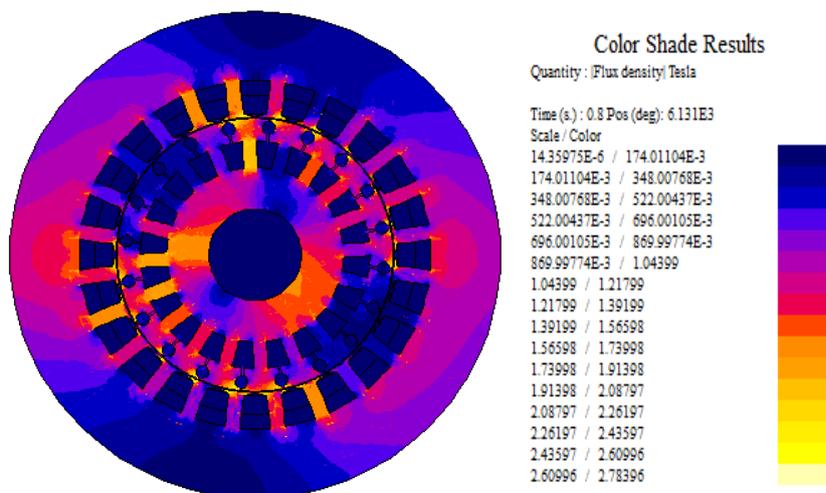


Figure. IV.148. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.8(s)

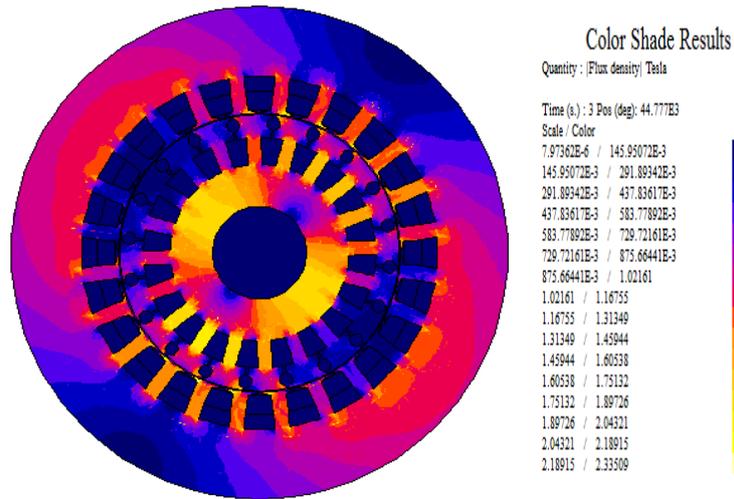


Figure. IV.149. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 3(s)

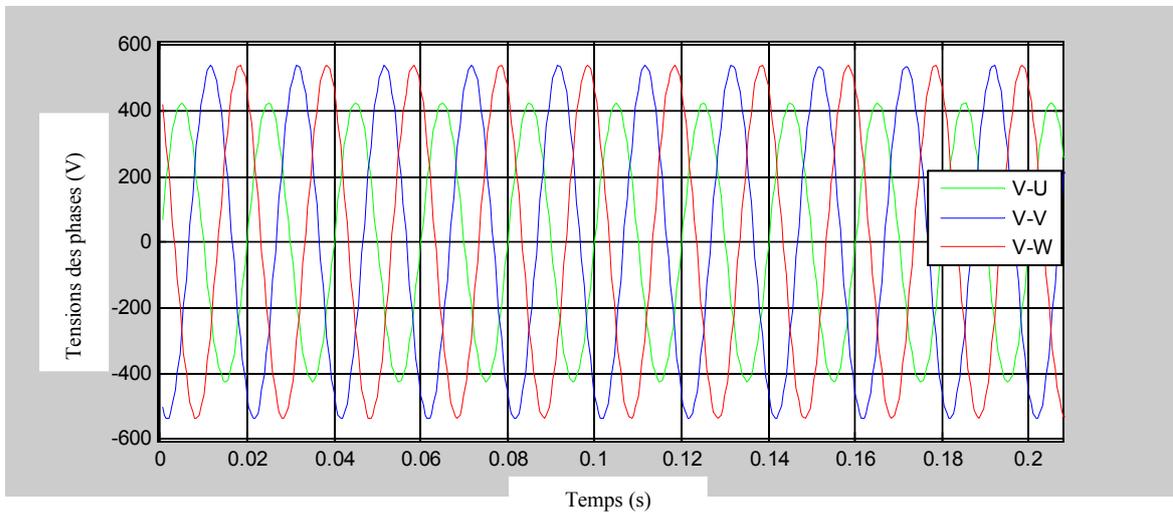


Figure. IV.150. Forme d'onde de la tension phase (V\_U déséquilibrée)

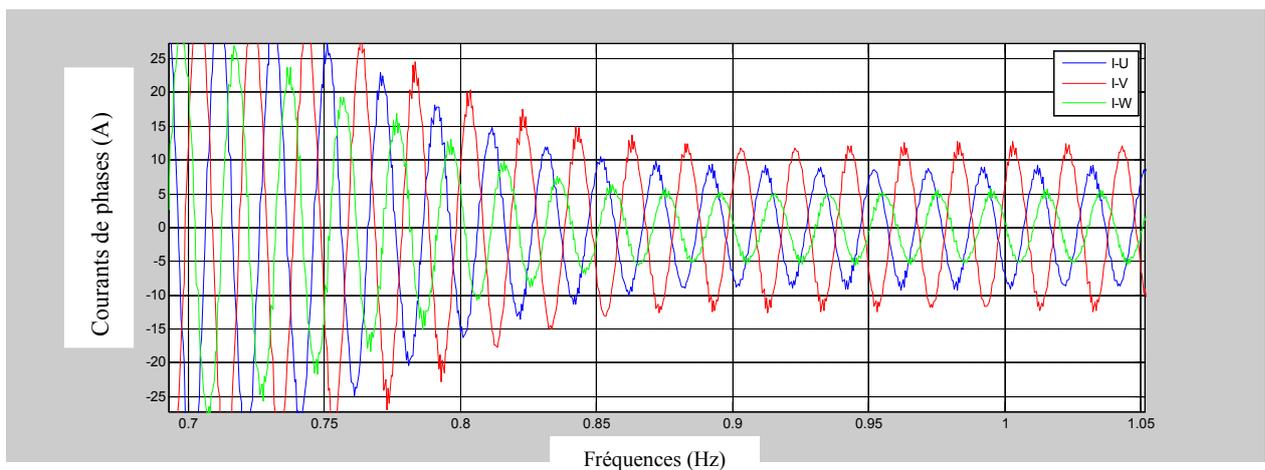


Figure. IV.151. Forme d'onde du courant statorique phase (V\_U déséquilibrée)

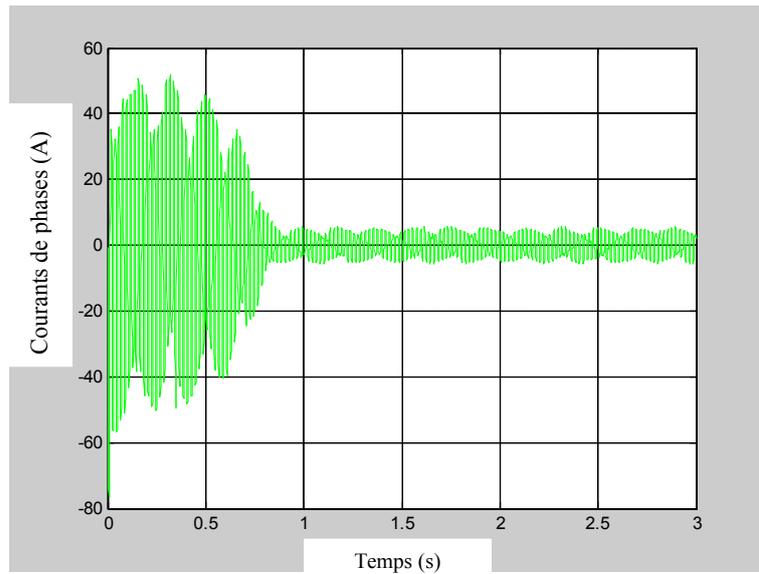


Figure. IV.152. Forme d'onde du courant statorique phase (V<sub>U</sub> déséquilibrée).

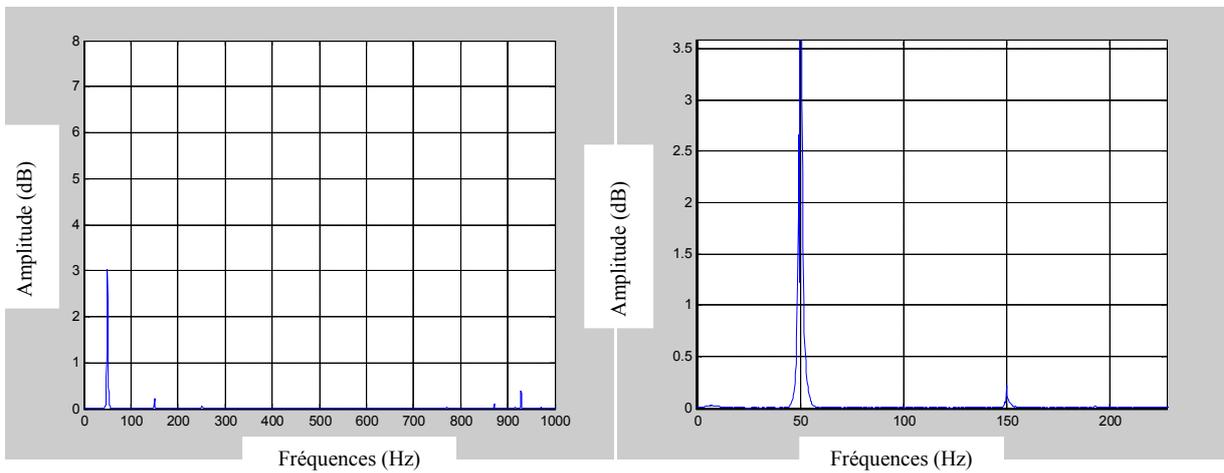


Figure. IV.153. Spectre (avec zoom) du courant statorique phase V<sub>U</sub>.

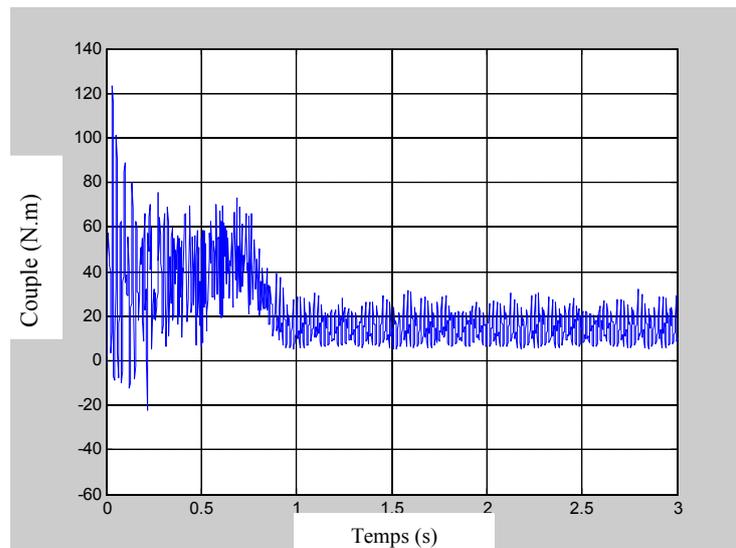


Figure. IV.154. Couple électromagnétique de la machine.

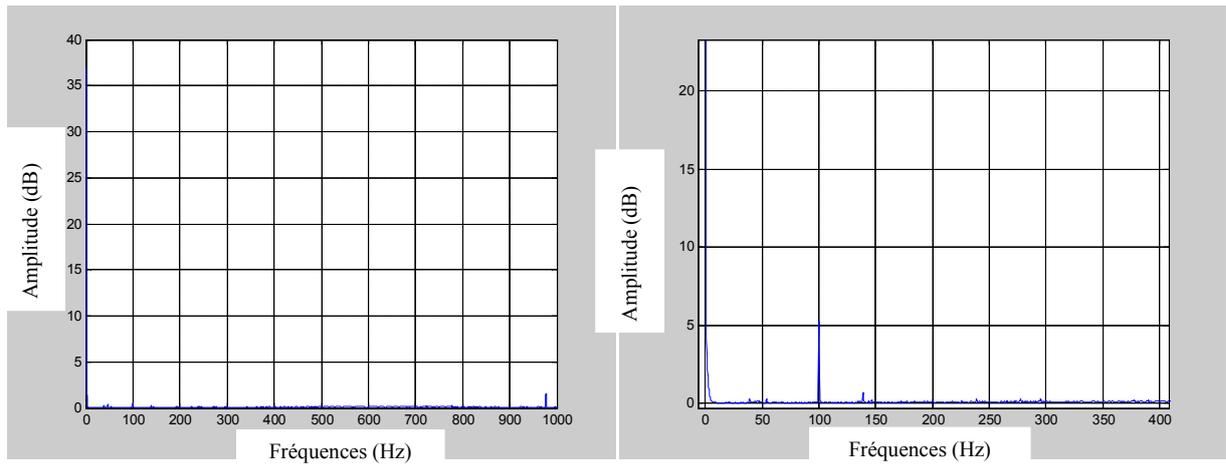


Figure. IV.155. Spectre du Couple électromagnétique (avec zoom) de la machine.

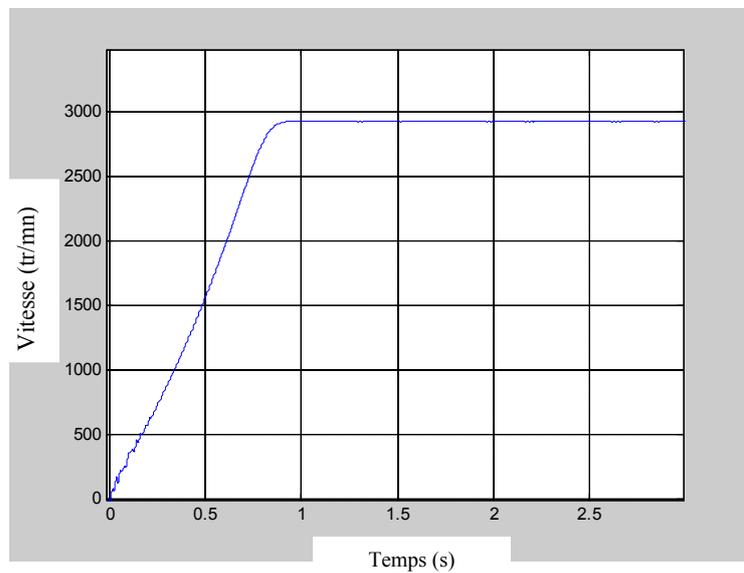


Figure. IV.156. Vitesse de rotation de la machine.

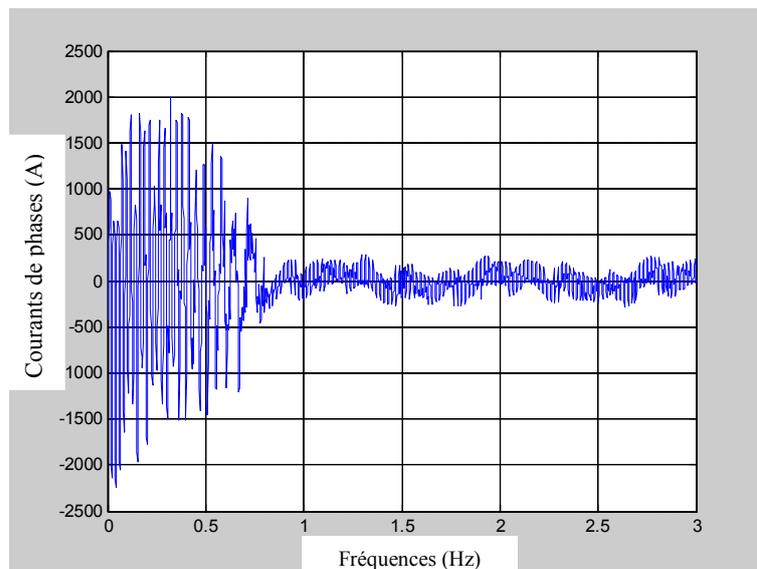


Figure. IV.157. Le courant des barres casse (5) à l'état d'une phase ( $V_U$ ) déséquilibrée.

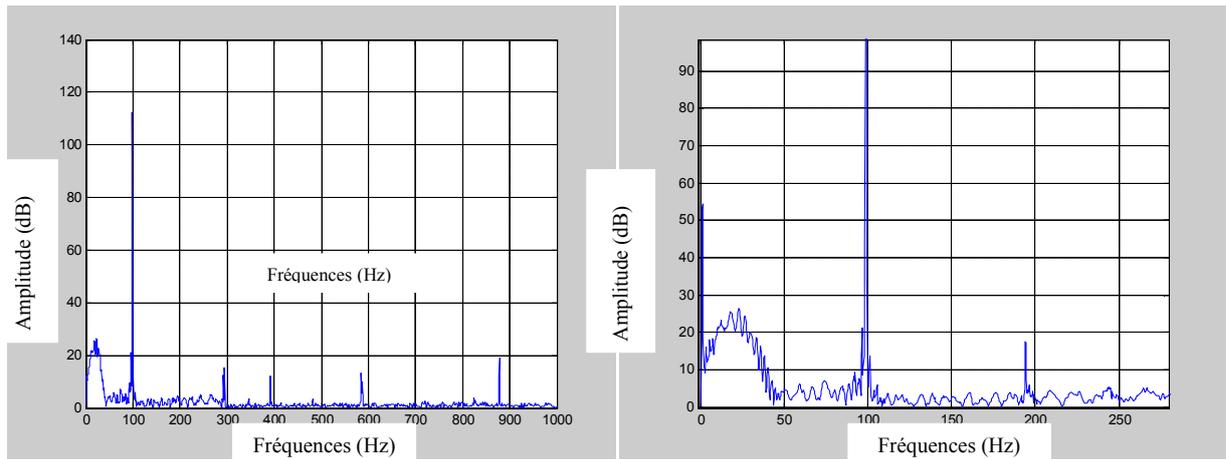


Figure. IV.158. Spectre (avec zoom) du courant d'une barre cassée(5).

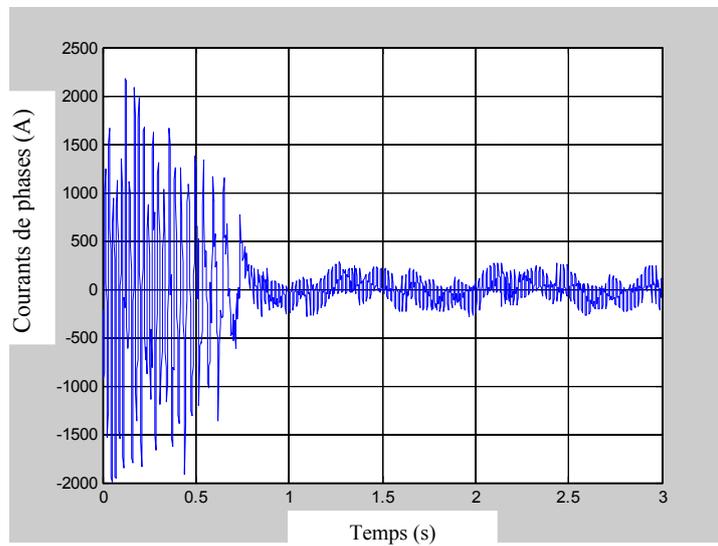


Figure. IV.159. Le courant des barres casse (10) à l'état d'une phase (V\_U) déséquilibrée.

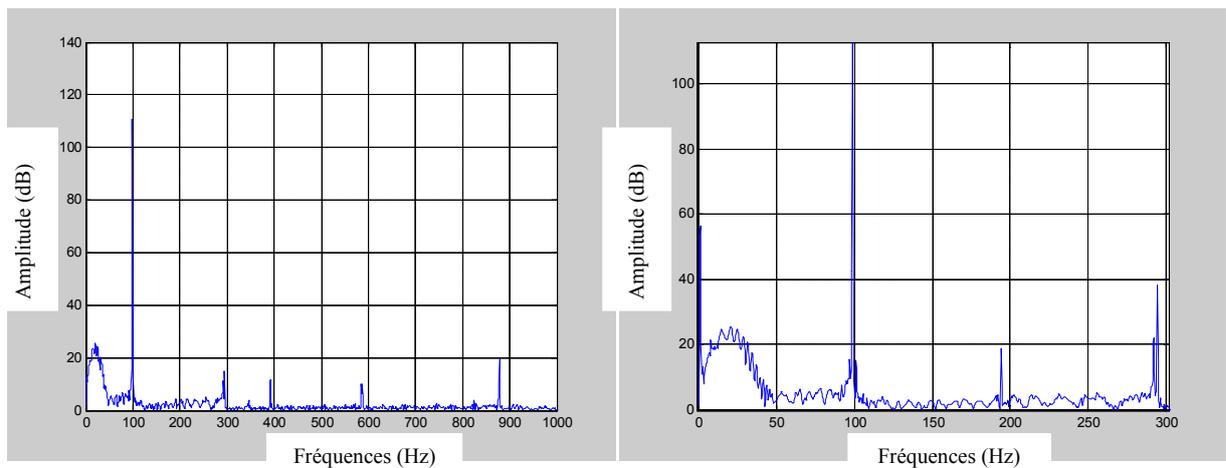


Figure. IV.160. Spectre (avec zoom) du courant d'une barre cassée(10).

IV.4.5 Cas de cassure de deux barres avec deux tensions déséquilibrées.

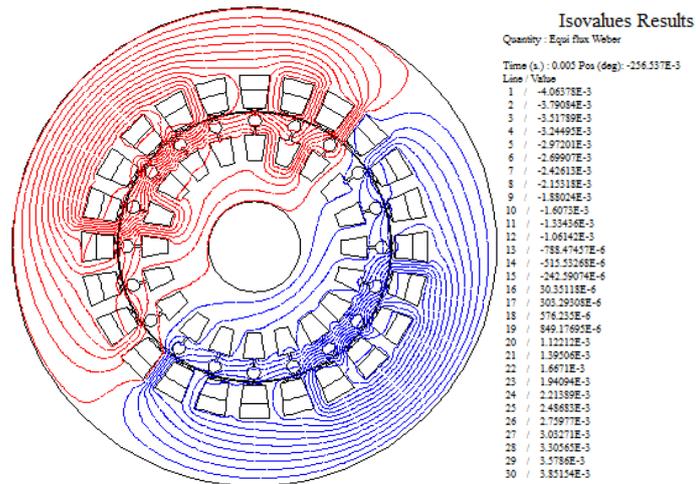


Figure. IV.161. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.005 (s).

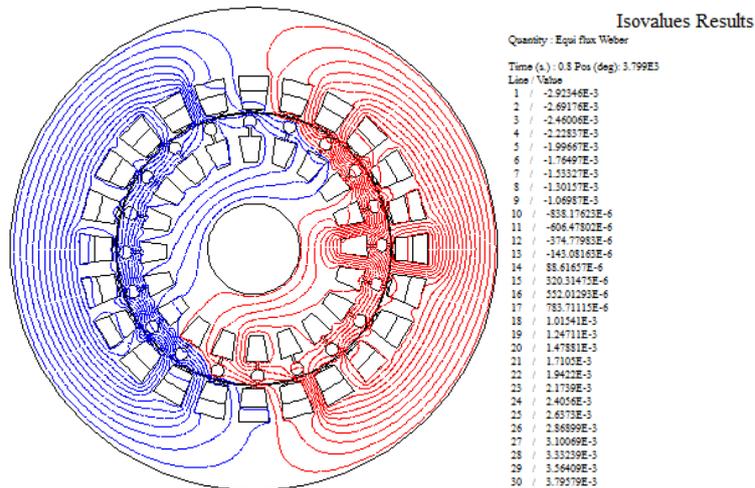


Figure. IV.162. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 0.8 (s).

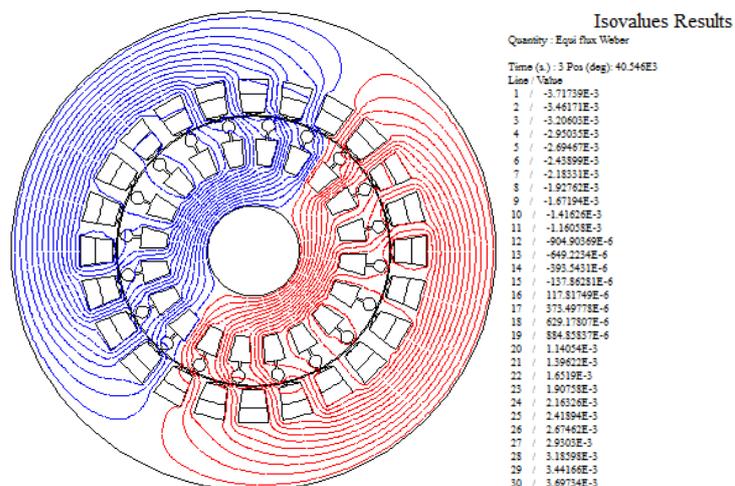


Figure. IV.163. Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 3 (s).

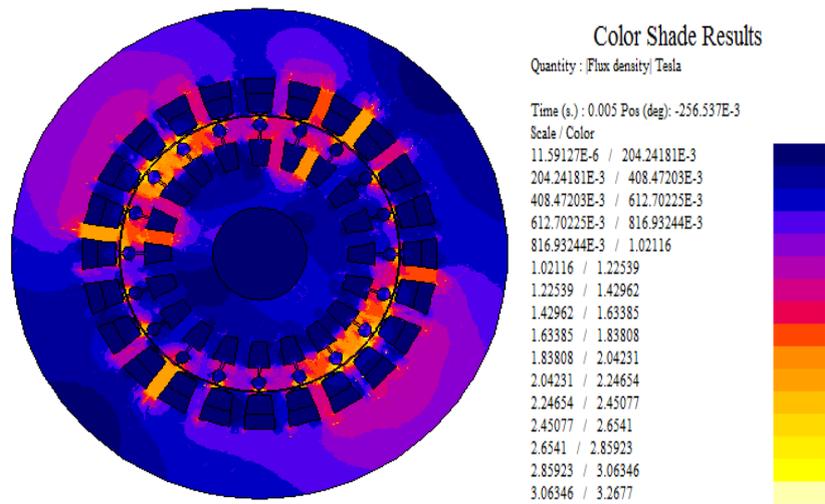


Figure. IV.164. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.005(s)

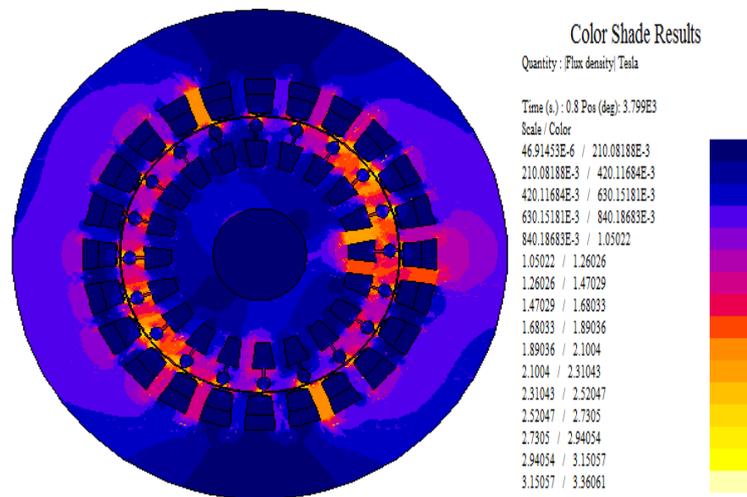


Figure. IV.165. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 0.8(s)

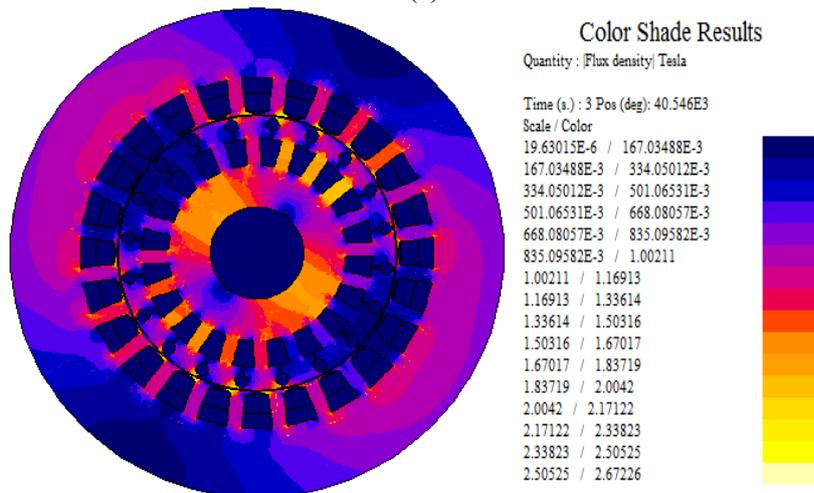


Figure. IV.166. Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 3 (s)

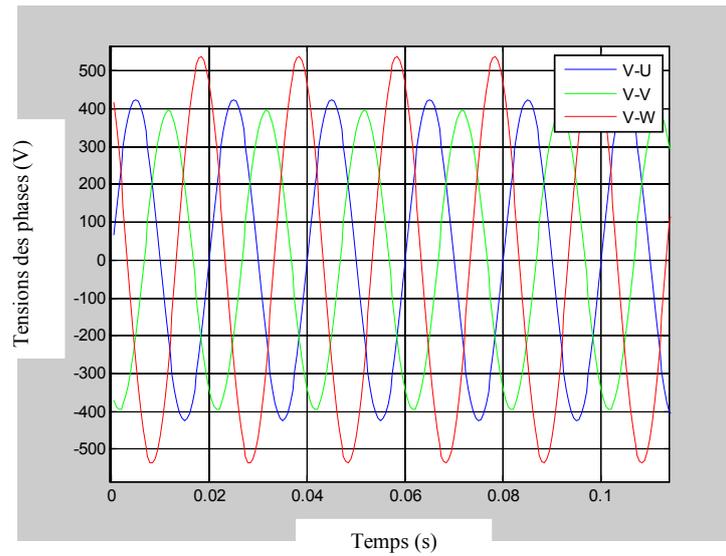


Figure. IV.167. Forme d'onde de la tension phase ( $V_U$  et  $V_V$  déséquilibrée)  $V_W$  équilibrée

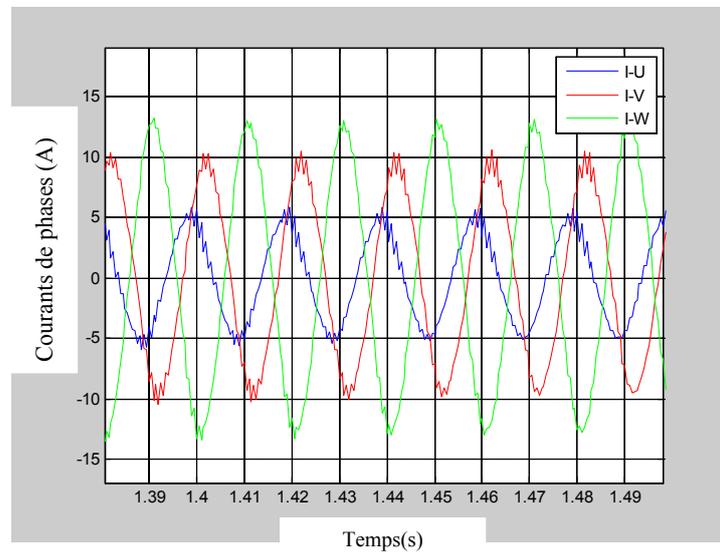
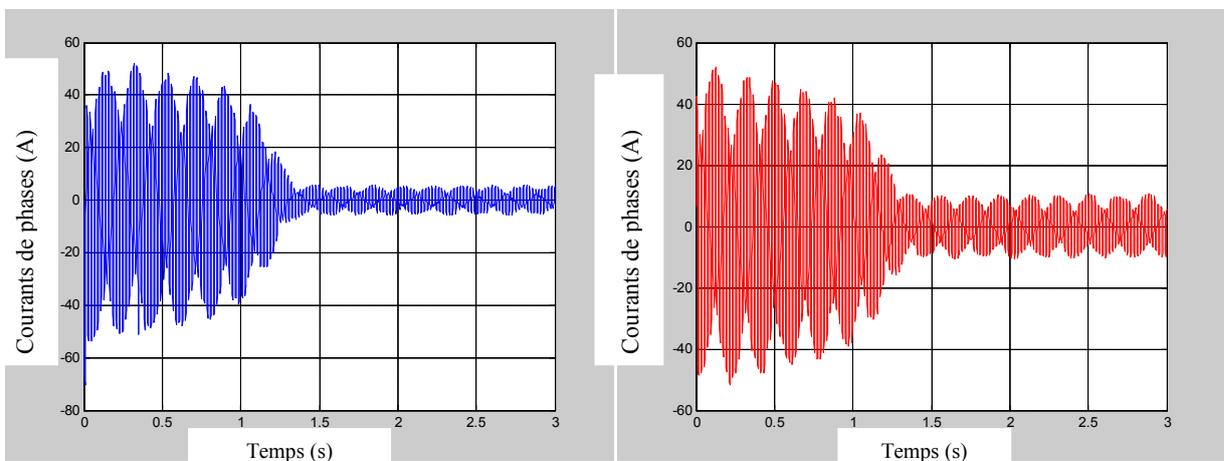
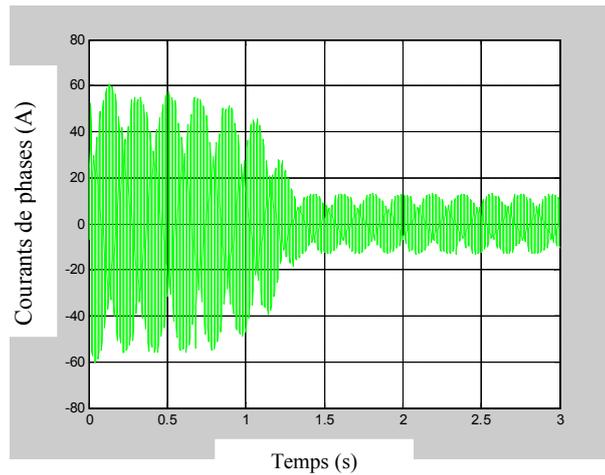


Figure. IV.168. Forme d'onde du courant statorique phase ( $V_U$  et  $V_V$ , déséquilibrée)



(a)

(b)



(c)

Figure. IV.169. Forme d'onde du courant statorique :

(a) phase V\_U, (b) phase V\_V, (c) V\_W

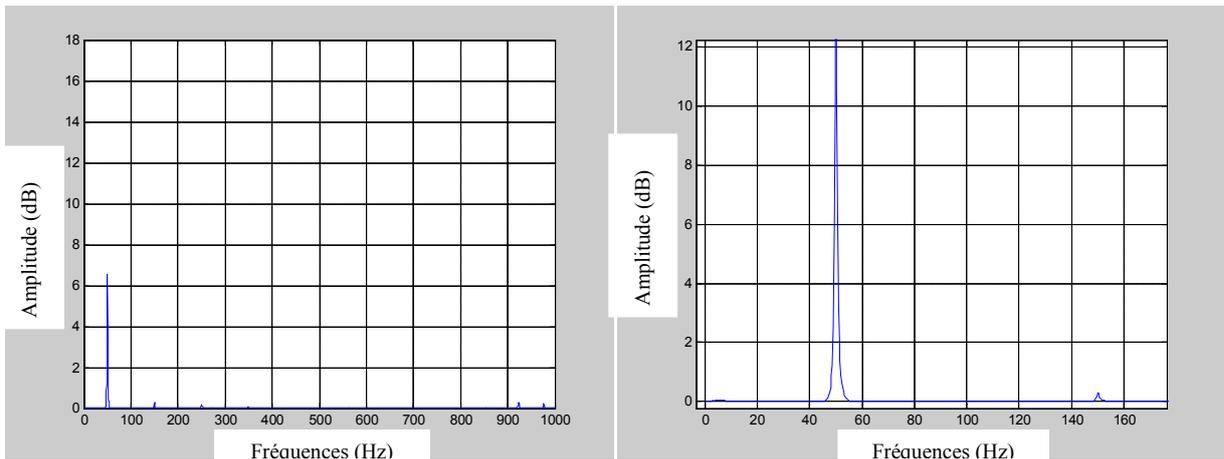


Figure. IV.170. Spectre (avec zoom) du courant statorique phase V\_U.

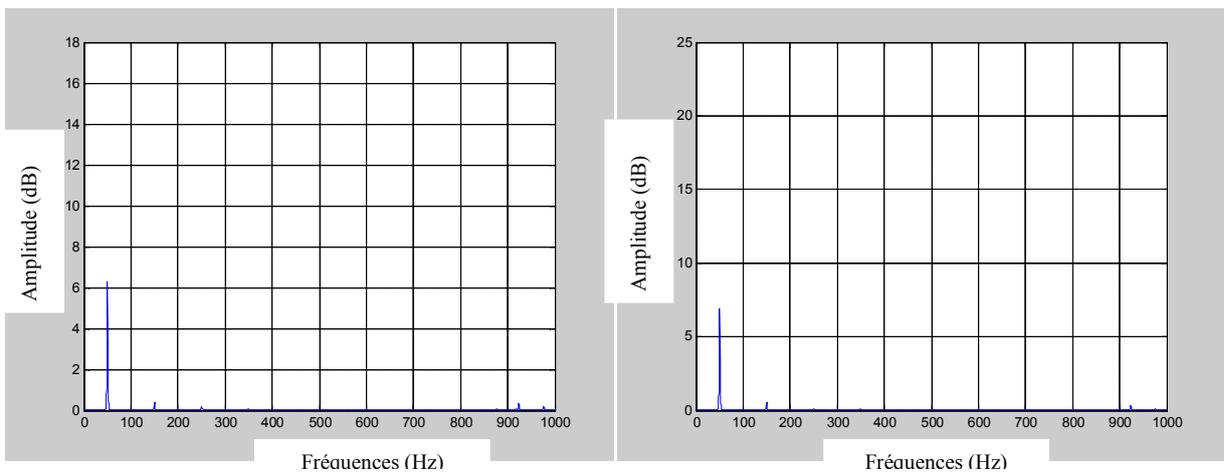


Figure. IV.171. Spectre du courant statorique phase V\_V et phase V\_W.

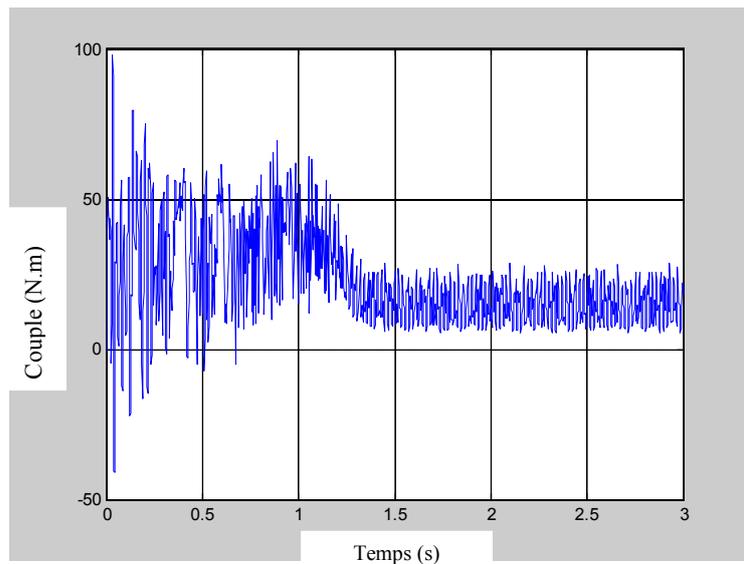


Figure. IV.172. Couple électromagnétique de la machine.

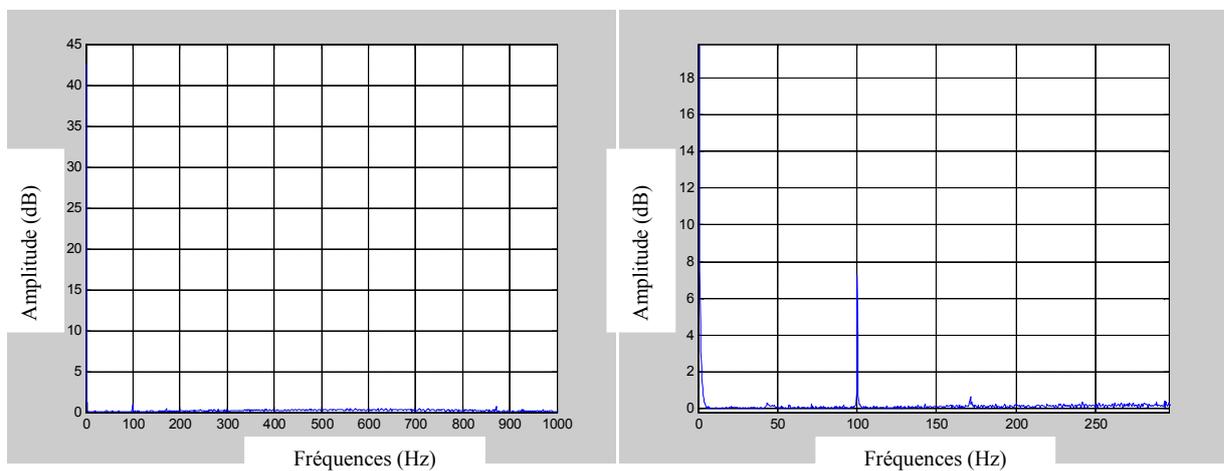


Figure. IV.173. Spectre du Couple électromagnétique (avec zoom) de la machine.

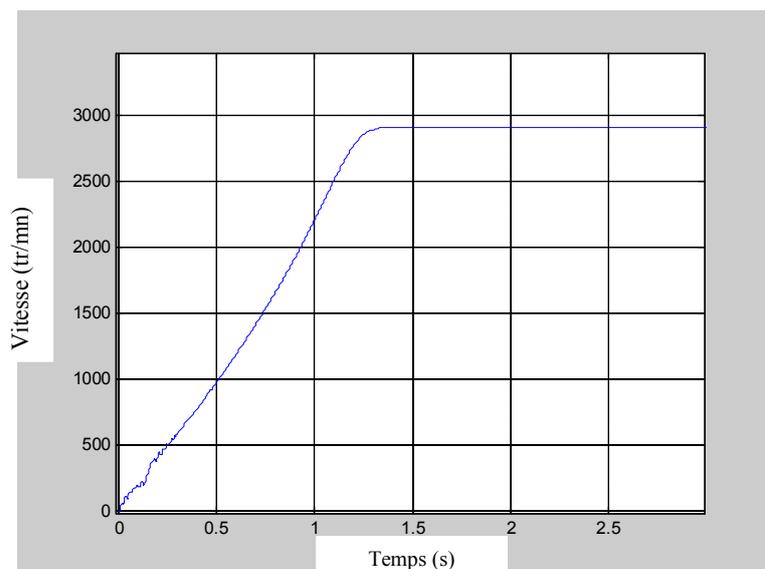


Figure. IV.174. Vitesse de rotation de la machine.

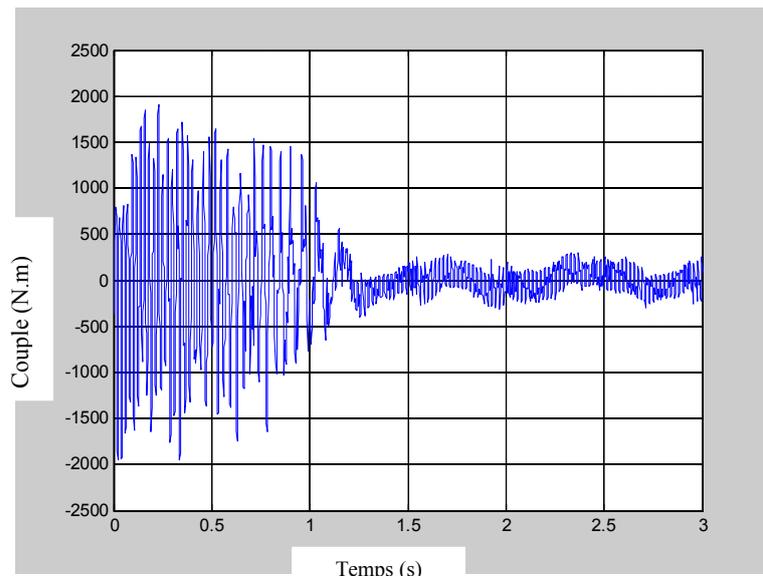


Figure. IV.175. Le courant des barres cassé (5) à l'état de la phase ( $V_U$ ,  $V_V$ ) déséquilibrée.

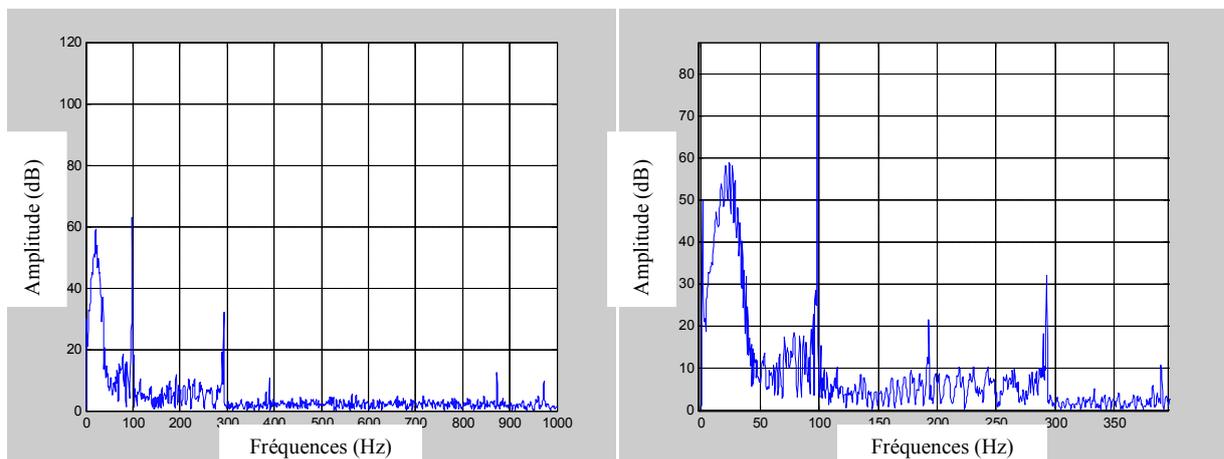


Figure. IV.176. Spectre (avec zoom) du courant d'une barre cassée(5).

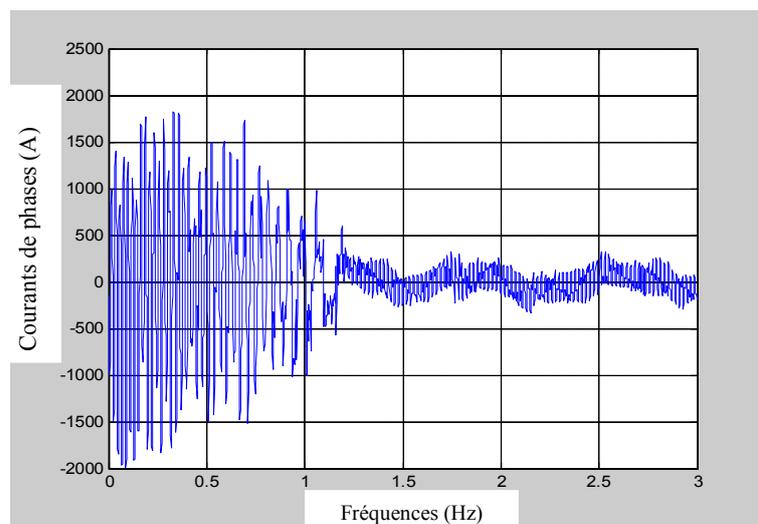


Figure. IV.177. Le courant des barres cassé (10) à l'état de la phase ( $V_U$ ,  $V_V$ ) déséquilibrée.

### **IV.5. Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats des simulations du comportement de la MASY ayant un défaut rotorique qui s'agit d'une rupture d'une barre rotorique ou un défaut qui est dû à un déséquilibre de tension d'alimentation, ou un défaut qui associe la rupture d'une barre rotorique et un déséquilibre de la tension d'alimentation. Les résultats montrent que la présence d'un de ces défauts ou les deux marque une signature et qui influe considérablement sur le bon fonctionnement d'une machine.

### Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire est une contribution à la modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil en vue du diagnostic des défauts statoriques et des défauts rotorique.

Le début de ce mémoire a été marqué par un rappel des différents types des machines électrique et sont définition .Après cela on a présenté les différents défauts qui peuvent affectés le bon fonctionnement des machines asynchrones triphasées à cage, ainsi que leurs causes et leurs signatures spectrales. Selon la littérature et la brève présentation des diverses méthodes du diagnostic, nous avons constaté que l'analyse du courant statorique est la méthode la plus utilisée vu sa simplicité et son efficacité de prévoir un défaut dès lors que ses premiers signes commencent à apparaître, ce qui nous a incité à adopter cette technique.

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

Nous avons utilisé le programme de la transformée de Fourier rapide du "Toolbox Matlab", pour exploiter le contenu spectrale du courant statorique et par conséquent de déterminer les composantes  $|f_s + R f_r|$  U-PSH et  $3k f_s$  caractérisant le défaut statorique. En suite, nous avons montré l'influence de la charge sur le PSH,  $3f_s$ . Nous avons trouvé que la loi de variation des amplitudes de  $3f_s$  est inversement proportionnelle de la charge quelle que soit le type de défaut (cassure de barres, déséquilibre des phases d'alimentation).Ceci, donne une indication sur la sévérité du défaut, mais l'amplitude de PSH reste presque constante.

De plus que l'analyse spectrale du courant des phases statoriques, notre modèle qui prend en compte des harmoniques de la saturation dans le de défaut statorique. L'inconvénient de cette méthode est le temps de calcul qui est très long.

En perspective, nous proposons à court terme d'étudier la modélisation de la machine asynchrone en présence de défauts statoriques expérimentalement avec une comparaison avec les résultats obtenus par la méthode des éléments finis.

## Bibliographie

- [01] Gaetan DIDIER, « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances », Thèse de doctorat, Nancy, France 2004.
- [02] A. Abed, "*Contribution à l'Etude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone*", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, France, Mars 2002.
- [03] S. Mohamed, "Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones ", Thèse de Doctorat, UNV Mohamed KHIDER Biskra ,2010.
- [04] P. O'Donnell, "*Report of Large Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations*", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA-21, Part 1, N°4, PP. 853-864, 1985.
- [05] Hubert RAZIK «le contenu spectral du courant absorbé par la machine asynchrone en cas de défaillances, un état de l'art. »La revue 3EI n0 29- Juin 2002- page 48-52
- [06] A. H. Bonnett and G. C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three phase squirrel-cage induction motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, pp. 921-937, 1992.
- [07] Allianz, "*Présentation des Avaries. Machines Electriques Tournantes*", Cahier des préventions, CP2, 1988.
- [08] A. Ibrahim, "*Contribution au Diagnostic de Machines Electromécaniques: Exploitation des Signaux Electriques et de la Vitesse Instantanée*", Thèse de Doctorat, Université de Saint Etienne, France, 2009.
- [09] B. Vaseghi, "*Contribution à l'Etude des Machines Electriques en Présence de Défaut Entre-Spires Modélisation-Réduction du Courant de Défaut*", Thèse de Doctorat, Université de Nancy, France, 2009.
- [10] A. H. Bonnett, G. C. Soukup, "*Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three Phase Squirrel Cage Induction Motors*", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, N°4, PP. 921-937, 1992.
- [11] M. Bouzid, G. Champenois, "*An Efficient, Simplified Multiple-Coupled Circuit Model of the Induction Motor Aimed to Simulate Different Types of Stator Faults*", Elsevier, Journal of Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 90, PP 98-115, 2013.
- [12] M. Blodt, P. Granjon, B. Raison, and G. Rostaing, "Models for Bearing Damage Detection in Induction Motors Using Stator Current Monitoring," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 55, pp. 1813-1822, 2008.

- [13] D. F. Busse, J. M. Erdman, R. J. Kerkman, D. W. Schlegel, and G. L. Skibinski, "The effects of PWM voltage source inverters on the mechanical performance of rolling bearings," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, pp. 567-576, 1997.
- [14] W. T. Thomson, "A review of on-line condition monitoring techniques for three-phase squirrelcage induction motors—past, present and future," in *2nd IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives - SDEMPED '99*, Gijon, Spain, 1999, pp. 3-17.
- [15] D. G. Dorrell and A. C. Smith, "Calculation of UMP in induction motors with series or parallel winding connections," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 9, pp. 304-310, 1994
- [16] D. G. Dorrell, W. T. Thomson, and S. Roach, "Analysis of airgap flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, pp. 24-34, January/February 1997.
- [17] S. Nandi, T. C. Ilamparithi, L. Sang Bin, and H. Doosoo, "Detection of Eccentricity Faults in Induction Machines Based on Nameplate Parameters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 1673-1683, May 2011.
- [18] R. N. Andriamalala, H. Razik, L. Baghli, and F. M. Sargos, "Eccentricity Fault Diagnosis of a Dual-Stator Winding Induction Machine Drive Considering the Slotting Effects," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, pp. 4238-4251, December 2008.
- [19] H. Razik, "Le contenu spectral du courant absorbe par la machine asynchrone en cas de défaillance, un état de l'art," *La revue 3EI*, vol. 29, pp. 48-52, Juin 2002.
- [20] A. Ceban, R. Pusca, and R. Romary, "Study of rotor faults in induction motors using external magnetic field analysis," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. PP, p. 12, 2011.
- [21] G. R. Bossio, C. H. De Angelo, J. M. Bossio, C. M. Pezzani, and G. O. Garcia, "Separating Broken Rotor Bars and Load Oscillations on IM Fault Diagnosis Through the Instantaneous Active and Reactive Currents," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, pp. 4571-4580, November 2009.
- [22] T. Boumegoura, "Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic," Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon Ecully, France, 2001.

- [23] E. Schaeffer, "Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts," Thèse de doctorat, Institut de Recherche en Cybernétique de Nantes, École Centrale de Nantes, Nantes, France, 1999.
- [24] G.Dedier, «*Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances*» thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, 2004.
- [25] A. Ghouggal, «*Diagnostic de la machine asynchrone triphasée : modèle dédié à la détection des défauts*» mémoire de magister, Université de Batna 2005.
- [26] S. Khelif, «*Modélisation de la machine asynchrone en vue diagnostic prise en compte adéquate du circuit magnétique* », mémoire de magistère, Electrotechnique Université de Mohammed Khaider Biskra, 2012.
- [27] D.E. Khoudja, «*Elaboration d'un système intelligent de surveillance et de diagnostic automatique en temps réel des défaillances des moteurs à induction*»thèse de doctorat, Université de Boumerdès 2007.
- [28] Gojko M. Joksimovic, J. Riger, T. M. Wolbank, Nedjeljko Peric, Mario Vasak "Stator-Current Spectrum Signature of Healthy Cage Rotor Induction Machines", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, N°9, PP. 4025-4033, 2013.
- [29] J. C. Sabonnadière, J. L. Coulomb "Calcul des Champs Electromagnétiques", Techniques de l'Ingénieur, D3020.
- [30] R. Casimir, E. Bouteleux, H. Yahoui, G. Clerc, H. Henao, C. Delmotte, G. A. Capolino, G. Rostaing, J. P. Rognon, E. Foulon, L. Loron, H. Razik, G. Didier, G. Houdouin, G. Barakat, B. Dakyo, S. Bachir, S. Tnani, G. Champenois, J. C. Trigeassou, V. Devanneaux, B. Dagues, and J. Faucher. Comparaison de plusieurs méthodes de modélisation de la machine asynchrone en présence de défauts. *Electrotechnique du Futur*, Décembre 2003.
- [31] E. Schaeffer. *Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 1999.