



معهد المناجم
Institut des Mines

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur
Et de la Recherche Scientifique



جامعة العربي التبسي
Université Larbi Tebessi

جامعة العربي التبسي
Université Larbi Tebessi
معهد المناجم
Institut des Mines
قسم الالكتروميكانيك
Département Électromécanique

*Mémoire du projet de fin de cycle en vue de l'obtention
du diplôme de Master en :*

Filière: Génie minier

Spécialité : Électromécanique minière

Thème

**Détection et localisation de défauts de moteur
asynchrone à cage d'écureuil**

Présenté par :

- Kadri Islam Touhami
- Belmebrouk Mohammed Abdelhadi

Devant le jury composé de :

- | | | | |
|----------------------|-----------|-----|--------------------------|
| • Aoulmi Zoubir | Président | MCA | Université Larbi Tebessi |
| • Rais Khaled | Examineur | MCB | Université Larbi Tebessi |
| • Moghrani Radhouane | Encadreur | MAB | Université Larbi Tebessi |

Année universitaire : 2019/2020

Année universitaire : 2019/2020

Tébessa le : 23/09/2020

Lettre de soutenabilité

Nom et prénom des étudiants :

1: Belmebrouk mohammed Abdelhadi

2: Kadri islam touhami

Niveau : Master 2

Electromécanique minière

Option :

Thème : détection et localisation de défauts moteur asynchrone a cage d'écureuil

Nom et prénom de l'encadreur : Moghrani Radhouane

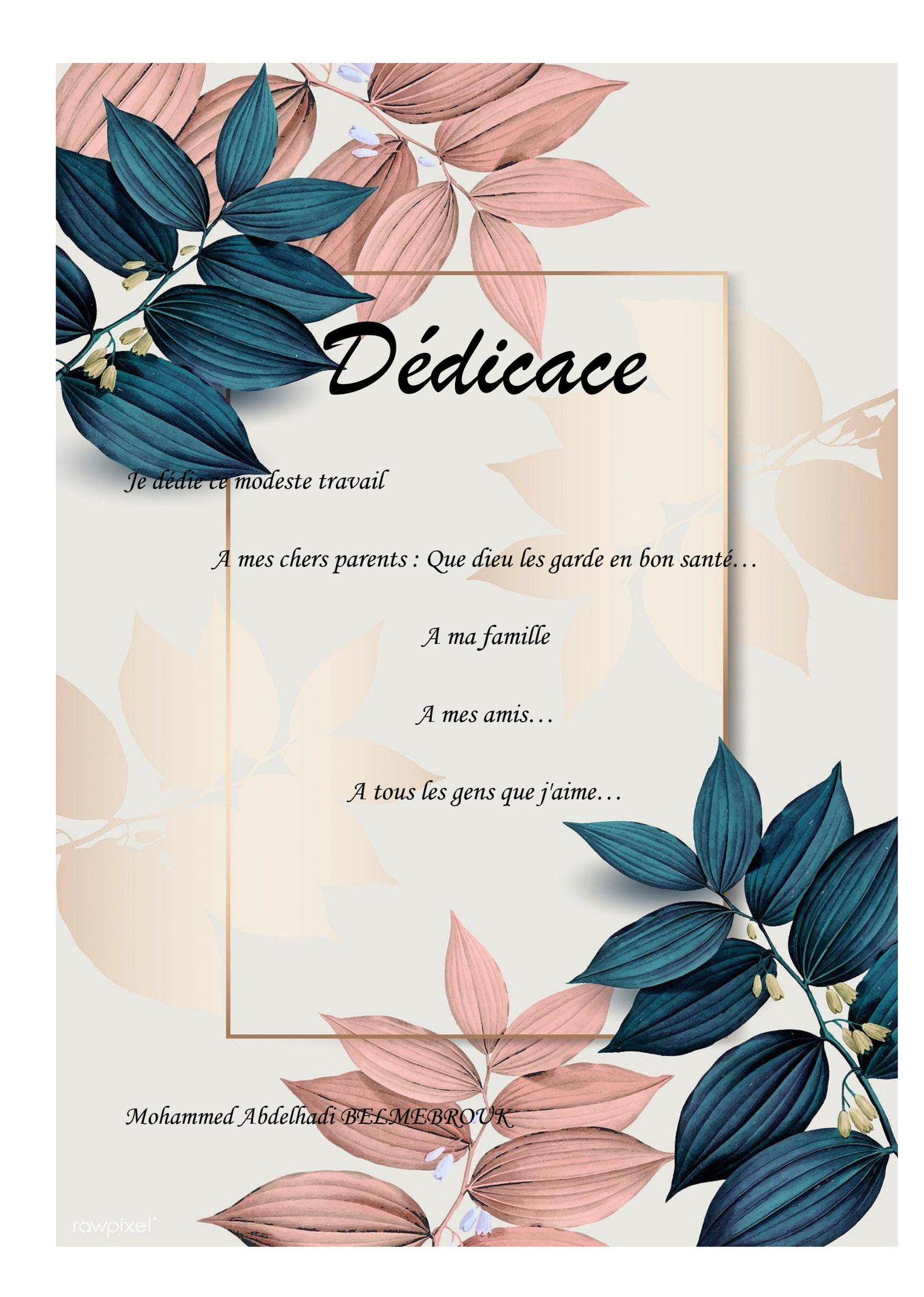
Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
Chapitre I : maintenance des moteurs électriques	
Chapitre II : Méthodes de diagnostic pour machine électrique	
Chapitre III : modélisation et simulation d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil	
Chapitre IV : détection et diagnostics de défauts d'un moteur asynchrone par les méthodes de Park et Hilbert	

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

À ma chère mère Jamila, pour son soutien et son sacrifice pour moi depuis ma naissance. Et à mon père, que Dieu ait pitié de lui, à qui j'ai voulu assister aujourd'hui à cause de son honneur, car il était un soutien pour moi. Et à mes frères et sœurs Ikram Rania Yasser et Rayan pour leurs encouragements pour moi. À toute ma famille et mes amis je dédie ce travail

Kadri Islam



Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents : Que dieu les garde en bon santé...

A ma famille

A mes amis...

A tous les gens que j'aime...

Mohammed Abdelhadi BELMEBROUK

Remerciement

Avant tout nous remercions **Allah** qui nous a donné la patience et la force nécessaire pour terminer ce travail.

Le travail présenté dans cette mémoire a été effectué au département d'électromécanique de l'Institut des mines, Tébessa.

Ainsi, obtient également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur le docteur « **Moghrani Radhouane** » pour avoir d'abord proposé ce thème, pour suivi continuel tout le long de la réalisation de cette thèse et qui n'a pas cessé de me donner ses conseils et remarques.

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

Obtiens tenons à remercier vivement toutes personnes qui m'aidé a élaboré et réalisé cette mémoire, ainsi à tous ceux qui nous a aidés de près ou de loin accomplir ce travail.

Nous remercions tous les enseignants de département de Mine et D'Électromécanique spécialement les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Les meilleurs sentiments sont destinés pour la famille « **BELMEBROUK** » « **BENYACOUB** », et la famille « **KADRI** ». On remercie également tous les amis et tous les potes.

On remercie également tous les amis et tous les potes.

Si on a oublié quelqu'un, on le prie de me pardonner.

RESUME

La thèse suivante parlera sur le comportement d'un moteur asynchrone lors de l'existence d'un défaut soit mécanique ou bien électrique. et aussi en va voir les méthodes de diagnostic utilisées. Ces méthodes nécessitent la connaissance de l'état sain de moteur et la détection d'un défaut est basée sur la comparaison de la signature d'un état d'effectué donné avec un état supposé sain. L'analyse du signal nous permet de détecter d'éventuels dysfonctionnements par des capteurs installées à l'entrée et la sortie de moteur électrique d'effectué.

Mots clés : moteur électrique, maintenance, modélisation, simulation, diagnostic, détection, défaut.

المخلص

تتحدث الأطروحة التالية عن سلوك المحرك غير المتزامن أثناء حدوث عطل ميكانيكي أو كهربائي، كما ستعرض طرق التشخيص المستخدمة. تتطلب هذه الأساليب معرفة الحالة الصحية للمحرك ويستند اكتشاف الخطأ إلى مقارنة توقيع حالة معينة بحالة يفترض أنها صحية. تحليل الإشارة يمكننا من الكشف عن الأعطال المحتملة بواسطة أجهزة استشعار مثبتة في مدخل ومخرج المحرك الكهربائي المعيب.

الكلمات المفتاحية : محرك كهربائي , صيانة , نمذجة , محاكاة , تشخيص , كشف , عيب

Abstract

The following thesis will talk about the behavior of an asynchronous motor during the occurrence of a fault either mechanical or electrical. And also will see the diagnostic methods used. These methods require knowledge of the healthy state of the engine and the detection of a fault is based on the comparison of the signature of a given faulted state with a supposedly healthy state. Signal analysis allows us to detect possible malfunctions by sensors installed at the inlet and outlet of the faulty electric motor.

Keywords: Electric Motors, maintenance, modelization, simulation, diagnostic, detection, fault.

LISTE DES DE FIGURES

<i>N°Fig</i>	<i>Titre de figure</i>	<i>N°Page</i>
<i>CHAPITRE 1</i>		
<i>Figure 1.1</i>	Description de la machine à courant continu	4
<i>Figure 1.2</i>	Deux moteurs pas à pas	6
<i>Figure 1.3</i>	Quelques causes de déséquilibres (ou balourds)	9
<i>Figure1.4</i>	Déséquilibre statique	9
<i>Figure 1.5</i>	Déséquilibres de couple	10
<i>Figure 1.6</i>	Les Déséquilibres dynamiques	10
<i>Figure 1.7</i>	Évolution brutale de la vibration du balourd	11
<i>Figure 1.8</i>	Frontières de frottement-échauffement	12
<i>Figure 1.9</i>	Principaux enlèvements d'un roulement à bill	12
<i>Figure 1.10</i>	Défaut sur la bague extérieur	13
<i>Figure 1.11</i>	Défaut sur la bague intérieur	13
<i>Figure 1.12</i>	Défaut sur la cage	14
<i>Figure 1.13</i>	Défaut sur la bille	14
<i>Figure 1.14</i>	Usure abrasive engrenage	15
<i>Figure 1.15</i>	Putting ou piqûres engrenage	16
<i>Figure 1.16</i>	Écaillage engrenage	16
<i>Figure 1.17</i>	Fissuration ou cracks engrenages	17
<i>Figure 1.18</i>	Le grippage engrenage	17
<i>Figure 1.19</i>	Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte	18
<i>Figure 1.20</i>	Différents défauts statoriques de la machine asynchrone	19
FigureI.21	Représentation de l'excentricité statique et dynamique	21
FigureI.22	Les différents types de maintenance	23

CHAPITRE 2		
Figure II.1	Composition d'un système industrielle (a) actionneurs (b) installations/processus (c) capteurs	30
Figure II.2	Classification de défauts	32
Figure II.3	Les différentes méthodes de diagnostic	32
Figure II.4	Principe de l'estimation	35
Figure II.5	Génération des résidus	35
Figure II.6	Principe des techniques d'identification	36
Figure II.7	Classification des méthodes de diagnostic	38
Figure II.8	Méthodes de diagnostic à base de données	39
CHAPITRE 3		
Figure III.1	construction d'un moteur asynchrone à cage (1) le stator,(2) le rotor,(3) flasques,(4) ventilateur de refroidissement ,(5) roulements à billes (6) boite à bornes, plus les tiges de montage et le capot de ventilation	48
Figure III.2	Modélisation de la machine asynchrone dans un repère triphasé	50
Figure III.3	transformation de repères	52
FigureIII.4	schéma équivalent dynamique dans un référentiel tournant	52
Figure III.5	systèmes d'axes triphasés	55
Figure III.6	la représentation de MAS dans l'espace électrique	55
FigureIII.7	Schéma fonctionnel des courants I_{qs} ,I_{ds} ,I_{qr} ,I_{dr} , et les flux F_{qs} ,F_{ds} ,F_{qr} ,F_{dr} dans la base de Park (référentielle statorique) :	59
FigureIII.8	schéma fonctionnel de la transformation de Park directe	59
figureIII.9	schéma fonctionnel de la transformation de Park inverse	59
FigureIII.10	schéma fonctionnel simplifier couple électromagnétique	59
FigureIII.11	Schéma fonctionnel de la vitesse	60
FigureIII.12	Schéma fonctionnel flux statorique	60
figure.III.13-	Schéma fonctionnel simplifié de la machine asynchrone dans la base de Park	60
figureIII.14-	Schéma fonctionnel de l'alimentation triphasée 220V ,50Hz	60
FigureIII.15	schéma fonctionnel de l'alimentation triphasée 220V, 50Hz	61

figure.III.16	schéma fonctionnel de la charge	61
FigureIII.17	Schéma bloc de la machine asynchrone à vide alimentée en vue de simulation	61
FigureIII.18-	à gauche le spectre d'harmonique fondamental de la phase d'alimentation Van et à droite l'alimentation de tension triphasée équilibrée	62
FigureIII.19-	les courants statoriques	62
FigureIII.20	la vitesse de rotation	63
FigureIII.21	le couple électromagnétique	63
FigureIII.22	Simulation de la machine asynchrone à vide en fonction de temps	64
FigureIII.23	Simulation de la machine asynchrone à charge en fonction de temps	64
FigureIII.24	simulation de la machine à charge avec l'application d'un couple résistant $C_r = -50[\text{Nm}]$ de $0.2[\text{s}]$ à $0.8 [\text{s}]$ et $C_r = 50[\text{Nm}]$ de $1.4[\text{s}]$ à $1.6[\text{s}]$	65
CHAPITRE 4		
FigureIV.1	capteur a effet hall	69
FigureIV.2	Lissajous de courant de Park	71
Figure IV.3	couple résistant 40 nm à l'instant $t=3\text{s}$.	71
Figure IV.4	Lissajous de courant de Park avec application d'un couple résistant	71
FigureIV.5	l'effet de couple résistant 40nm sur le courant isa et courant de Park	72
FigureIV.6	déséquilibre de la phase alimentation va à l'instant 0.5s elle devient ou bien elle chute a 282.84volts a la place de la tension d'alimentation 311.12volts	72
FigureIV.7	la détection de défauts de déséquilibre de la phase a. Apparition des ondulations. L'instant $t=0.5\text{s}$.	73
FigureIV.8	déséquilibre de la phase alimentation va a l'instant $t=5\text{s}$ elle devient ou bien elle chute a 282.84volts a la place de la tension d'alimentation 311.12volts	73
FigureIV.9	la détection de défauts de déséquilibre de la phase a. l'instant $t=5\text{s}$. aussi couple résistant a l'instant $t=3\text{s}$	73
Figure IV.10	la forme de Lissajous lors détection de défauts a l'instant $t=5\text{s}$	74
Figure IV.11	détection de défauts de courant de a l'aide fft (les harmoniques)	74

<i>Figure IV.12</i>	la détection par fft nous voyons bien que l'effet de couple résistant est négligeable devant le défaut de déséquilibre de la phase a.	74
<i>Figure IV.13</i>	toujours le couple de 40nm est appliquée a l'instant t=3s.	75
<i>Figure IV.14</i>	Lissajous détection de défauts de l'inversion de phases a et b	76
<i>Figure IV.15</i>	défauts déséquilibre des tensions la phase a déséquilibrée : la phase a=311.12volts jusqu'a elle chute et devient à l'instant t=5s 254.558 volts et les autres phases b et c sont égales a 311.12 pas de chute de tension	79
<i>Figure IV.16</i>	défauts déséquilibre des tensions la phase a déséquilibrée : la phase a=311.12volts jusqu'a elle chute et devient a l'instant t=5s 254.558 volts et les autres phases b et c sont égales a 311.12 pas de chute de tension	79
<i>Figure IV.17</i>	Amplitude de Hilbert	80
<i>Figure IV.18</i>	Amplitude de Hilbert détection défaut par fft	80
<i>Figure IV.19</i>	detection défauts inversion phases a et b filter Hilbert	81
<i>Figure IV.20</i>	vitesse sans courts- circuit	82
<i>Figure IV.21</i>	Couple sans courts- circuit	82
<i>Figure IV.22</i>	couple électromagnétique=f(vitesse) sans défaut	83
<i>Figure IV.23</i>	Les courants statoriques avec 1cc	83
<i>Figure IV.24</i>	Courbe vitesse 1court-circuit t=3s	84
<i>Figure IV.25</i>	Courbe couple 1court-circuit t=3s	84
<i>Figure IV.26</i>	Courbe couple 1court-circuit t=3s	85
<i>Figure IV.27</i>	couple électromagnétique=f (vitesses) avec défaut 1c.c	85
<i>Figure IV.28</i>	Déformation Lissajous à cause de 1 c.c.	86
<i>Figure IV.29</i>	Enveloppe de Park amplitude avec fft pour détection de défaut 1c.c	86
<i>Figure IV.30</i>	Enveloppe de Hilbert amplitude avec fft pour détection de défaut 1c.c	87
<i>Figure IV.31</i>	Les courants statoriques 2cc	87
<i>Figure IV.32</i>	Courbe vitesse 2 court-circuit successives t=3s et t=3.5s	87
<i>Figure IV.33</i>	Courbe couple 2court-circuits successives t=3s et t=3.5s	88
<i>Figure IV.34</i>	couple électromagnétique=f (vitesses) avec défaut	88

<i>Figure IV.35</i>	déformation Lissajous à cause de 2 c.c.	88
<i>Figure IV.36</i>	Enveloppe de Park amplitude avec fft pour détection de défaut 2c.c	89
<i>Figure IV.37</i>	Enveloppe de Hilbert amplitude avec fft pour détection de défaut 2c.c	89
<i>Figure IV.38</i>	vitesse de rotation (rad/s)	90
<i>Figure IV.39</i>	Couple électromagnétique	90
<i>Figure IV.40</i>	Couple=f(vitesse)	90
<i>Figure IV.41</i>	Le courant Isa et l'enveloppe de Park	91
<i>Figure IV.42</i>	le courant Isa et l'enveloppe de Park et Hilbert	91
<i>Figure IV.43</i>	les déformations lis sajou à cause de 3 c.c	92
<i>FigureIV.44</i>	enveloppe de Park amplitude avec fft pour détection de défaut 3c.c	93
<i>Figure IV.45</i>	enveloppe de Hilbert amplitude avec fft pour détection de défaut 2c.c	93
<i>Figure IV.46</i>	comparaison des vitesses de cas sain avec les défauts (court-circuits)	93
<i>Figure IV.47</i>	courant Idr amplifié à cause de court-circuit	94
<i>Figure IV.48</i>	enveloppe Hilbert avec les harmoniques détectées par fft	95
<i>Figure IV.49</i>	enveloppe Park avec les harmoniques détectées par fft	95
<i>FigureIV.50</i>	Lissajous Park un anneau vide 1 barre cassée Park détection	97
<i>FigureIV.51</i>	Lissajous Park deux (2) anneaux vides 2 barres cassées Park détection	99
<i>FigureIV.52</i>	Lissajous Park trois (3) anneaux vides 3 barres de rotor cassé Park détection	101
<i>FigureIV.53</i>	Lissajous Park quatre(4) anneaux vides 4 barres de rotor cassé Park détection	103

LISTE DES TABLEAUX

<i>N°Tab</i>	Titre de tableau	<i>N°Page</i>
CHAPITRE 1		
<i>Tableau 1.1</i>	défauts des machines électriques selon l'origine	<i>07</i>
<i>Tableau 1.2</i>	Techniques d'analyse de l'état d'une machine tournante	<i>26</i>

SOMMAIRE

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

Chapitre I : maintenance des moteurs électriques

I-1-Introduction.....	3
I-2-définition d'une machine électrique.....	3
I-3- classification d'une machine électrique.....	3
I-3-1 machine à courant continu.....	3
I-3-2 les moteurs sans balais.....	4
I 3-3 machines courant alternatives.....	4
I-3-4 les machines auto synchrones.....	5
I-3-5 moteurs pas à pas	5
I-3-6 moteurs linéaires.....	6
I-4- Les défauts des machines électriques.....	6
I-5-La nature des défauts.....	8
I- 6- les causes des défauts.....	8
I- 7- les types des défauts	8
I-7-1- déséquilibre massique des rotors balourds.....	8
I-7-2-défauts des roulements	12
I-7-2-1- défaut sur la bague intérieure	13
I-7-2-2- défaut sur la bague intérieure	13
I-7-2-3- défaut sur la cage	13
I-7-2-4-défaut sur la bill.....	14
I-7-2-5- durée de vie d'un roulement.....	14
I-7-3- défaut d'engrenages.....	15
I-7-3-1-engrenage.....	15

I-7-3-2- défauts généralisés.....	15
I-7-3-3défauts localisés.....	16
I-7-4- excentricité	17
I-7-5- défauts statoriques	18
I-7-6 défauts rotoriques	20
I-8- définition des maintenances.....	22
I-9-politique de la maintenance	22
I-10-les différents types de maintenance.....	22
I-10-1- la maintenance corrective	23
I-10-2- la maintenance préventive.....	24
I-10-2-1- les types de maintenance préventive.....	24
I-10-2-2 les opérations de maintenance préventive.....	24
I-11-choix de techniques d'analyse.....	25
I-12- Conclusion.....	27

Chapitre II : Méthodes de diagnostic pour machine électrique

II-1- Notion diagnostic d'un système.....	29
II.1.1Généralités.....	29
II.1.2 Procédure de diagnostic.....	29
II.1.3 Types de défauts.....	29
II.1.3.1 Défauts actionneurs.....	30
II.1.3.2Défauts procédés.....	30
II.1.3.3Défauts capteurs.....	30
II.2 Quelques Définitions.....	30
II.3.Caractérisation de défauts.....	31
II.4Les méthodes de diagnostic des machines électriques.....	32
II-4-1- Etat de l'art des méthodes de diagnostic.....	32

II-4-1-1- les différents types de diagnostic.....	32
II.4.2.Le diagnostic appliqué aux machines électriques.....	33
II-4-3-méthode de diagnostic avec modèle analytique.....	34
II-4-3-1-techniques d'estimation d'état.....	34
II-4-3-2-techniques de génération de résidus.....	35
II-4-3-3-techniques d'identification.....	35
II-4-3-4-méthode de diagnostic sans modèle analytique.....	36
II-4-3-5-méthode par traitement de signal.....	36
II-4-3-6méthode par intelligence artificielle.....	37
II-4-4-méthodes basées sur les données.....	38
II-4-4-1-etapes de mise en œuvre des méthodes basées sur les données	39
II-5-conclusion	41

Chapitre III : modélisation et simulation d'un moteur asynchrone À cage d'écureuil

III-1-Introduction	46
III-2- description de la machine asynchrone triphasée(MAS).....	47
III-2-1 construction.....	47
III-2-2 principe de fonctionnement.....	48
III-3 modèle de la machine asynchrone triphasée.....	49
III-3-1hypothèses simplificatrices.....	49
III-3-2 équations électriques de la MAS.....	50
III-3-3- équations magnétiques de la MAS.....	50
III-3-4-equation mécanique de la MAS.....	53
III-4-transformation de Park.....	54
III-5-modélisation de la MAS dans le repère de Park	55
III- 5-1- choix du référentiel	56
III- 6- les équations utilisées dans le modèle simulent.....	57

III-7- résultats de la simulation de la machine asynchrone sous Matlab Simulink	62
III-7-1-interprétation du résultat.....	65
III-8- Conclusion.....	67

Chapitre IV : détection et diagnostics de défauts d'un moteur asynchrone par les méthodes de Park et Hilbert

IV-1- Introduction	69
IV-2-Approche des vecteurs de Park.....	69
IV-3-Defaut déséquilibre de la phase alimentation.....	72
IV-4 interprétation de résultats 1.....	77
IV-5-Detection défaut par filtrage Hilbert.....	77
IV-5-1-Introduction.....	77
IV-5-2-Approche Hilbert (filtre Hilbert).....	77
IV-6 interprétation de résultats 2.....	94
IV-6-1-defaut cassures barre rotorique de cage d'écureuil.....	95
IV-7 interprétation de résultats 3.....	104
IV-7-1 la rupture de 4 barreaux successivement.....	104
IV-7-2 défaut cassure barres	104
IV-8 Conclusion.....	105
Conclusion générale.....	106

Bibliographie

Annexe1

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La machine asynchrone occupe un domaine très important dans l'industrie et les transports. Elle est appréciée pour sa robustesse, son faible coût d'achat et d'entretien. et ne nécessite qu'une seule source d'alimentation. Malgré ces qualités évoquées, il n'est pas rare que ces moteurs présentent quelques défaillances émanant d'un vieillissement prématuré. Comme ces machines sont soumises pendant leur fonctionnement à plusieurs contraintes électrique, magnétique, mécanique et thermique. Ces dernières provoquent des défauts dans les différentes parties du moteur, ce qui engendre des arrêts conduisant à des pertes de production et à des réparations coûteuses.

Les défauts avec leurs effets ; se reflètent dans les grandeurs du moteur, principalement dans le flux, le courant, la vitesse et le couple. Dans le passé la plupart des techniques de diagnostic utilisaient les grandeurs mécaniques qui nécessitent l'introduction des capteurs au niveau de la machine ce qui rend l'équipement coûteux et encombrant, ces inconvénients ont poussés les recherches vers une maintenance [1] [2].

L'objectif principal de ce mémoire est de présenter une vue générale sur la maintenance. Nous insistons, en premier lieu, sur ces bases méthodologiques et techniques, d'une part. Et d'autre part, nous utilisons méthodes de Park et Hilbert comme solution globale, qui cerne assez bien les problèmes de défauts des machines électriques Cette approche est intéressante pour techniciens et ingénieurs puisqu'elle conduit naturellement à sélectionner les pannes les plus critiques, de trouver des solutions fiables.

Le présent travail est représenté en quatre chapitres. Dans un premier chapitre nous parlons maintenance des moteurs électriques. Dans le deuxième chapitre, est consacré aux méthodes de diagnostic pour machines électriques. Le troisième chapitre nous exposons une modélisation et simulation d'une machine électrique. Dans le quatrième chapitre nous intéressons à détection et diagnostics des défauts par les méthodes de Park et Hilbert et à la fin du quatrième chapitre, Notre travail se termine par une conclusion, qui résume l'ensemble des chapitres.

CHAPITRE I

Maintenance des moteurs électriques

I-1-Introduction :

Le diagnostic des défauts des machines électriques a fait l'objet d'une large attention et leur suivi a conduit à prévoir leurs dysfonctionnements et à éviter si possible le dysfonctionnement. Ceci est dû au rôle du diagnostic dans la continuité de fonctionnement de nombreux processus industriels. La validité du diagnostic permet de détecter précocement les défauts et d'éviter l'arrêt de la machine ainsi que de réduire les pertes financières. [3].

I.2. Définition d'une machine électrique

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.

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

Bien que toutes les machines électriques soient réversibles, elles agissent soit comme un moteur, soit comme un générateur, et l'utilisation de la machine détermine son comportement.

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, mais de même fréquence et de même forme [4-5].

I.3. Classification d'une machine électrique

Les machines électriques sont classées comme suit :

I.3.1. Machine à courant continu

Les machines électriques à courant continu sont constituées d'un stator (inducteur) et d'un rotor (induit), Le stator crée une magnétisation longitudinale fixe à l'aide d'enroulements (inducteur) ou d'aimants permanents. Le rotor est constitué d'un ensemble de bobines reliées à un collecteur rotatif. Le collecteur rotatif permet de maintenir fixe la direction transversale de magnétisation du rotor lorsque celui-ci tourne. Grâce à ce dispositif, les magnétisations, rotorique et statorique, sont toujours décalées de façon optimale (en quadrature) Ce décalage provoque un couple selon la loi du flux maximum (un pôle nord attire un pôle sud), provoquant ainsi la rotation du rotor.

L'avantage principal des machines à courant continu réside dans leur adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation.

Le défaut principal de la machine à courant continu réside dans l'ensemble balais/ collecteur rotatif qui se dégrade, est complexe à réaliser et consomme de l'énergie. Un autre problème limite les vitesses d'utilisation élevées de ces moteurs lorsque le rotor est bobiné c'est le phénomène de « défretage », la force centrifuge finissant par casser les liens assurant la tenue des ensembles de spires (le frettage) Les inconvénients ci-dessus ont été radicalement éliminés grâce à la « moteur à courant continu sans balais ». [4-5].

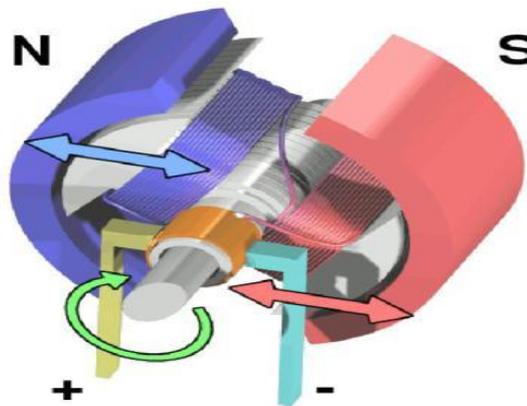


Figure I.1: Description de la machine à courant continu [4].

I.3.2. Les moteurs sans balais

Un moteur sans balais, est un moteur synchrone, dont le rotor est constitué d'un ou de plusieurs aimants permanents et pourvu d'origine d'un capteur de position rotorique.

Son appellation Brushless vient du fait que ce type de moteur ne contient aucun balai. un système électronique de commande doit assurer la commutation du courant dans les enroulements statoriques. Ce dispositif peut être soit intégré au moteur, pour les petites puissances, soit extérieur. Le rôle de l'ensemble capteur-électronique de commande est d'assurer l'autopilote du moteur c'est-à-dire le maintien de l'orthogonalité du flux magnétique rotorique par rapport au flux statorique, rôle autrefois dévolu à l'ensemble balais-collecteur sur une machine à courant continu. Les moteurs brushless équipent en particulier les disques durs et les graveurs de DVD de nos ordinateurs [6].

I.3.3. Machines à courant alternatif

Les moteurs à courant alternatif sont généralement alimentés par une source de courants polyphasés. Le système le plus fréquemment utilisé est alors le triphasé (phases décalées de 120°) utilisé par les distributeurs d'électricité. Ces moteurs alternatifs se déclinent en trois types :

- _ Les moteurs universels.
- _ Les moteurs asynchrones.
- _ Les moteurs synchrones.

Ces deux dernières machines ne diffèrent que par leur rotor indifféremment en courant continu ou en courant alternatif, d'où son nom.

Ces moteurs ont un mauvais rendement, mais un coût de fabrication très réduit. Leur couple est faible, mais leur vitesse de rotation est importante. Quand ils sont utilisés dans des dispositifs exigeant un couple important, ils sont associés à un réducteur mécanique. Ils sont principalement utilisés dans l'électroménager, par exemple les aspirateurs, l'outillage électroportatif de faible puissance (jusqu'à environ 1200 W) et de nombreuses applications domestiques. [7].

a- Les machines synchrones

La machine synchrone est souvent utilisée comme génératrice. On l'appelle alors «alternateur». Mis à part pour la réalisation de groupe électrogène de faible puissance, cette machine est généralement triphasée. Pour la production d'électricité, les centrales électriques utilisent des alternateurs dont les puissances peuvent avoisiner les 1500 MW. Comme le nom l'indique, la vitesse de rotation de ces machines est toujours proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent.

Les machines synchrones sont également utilisées dans les systèmes de traction (tel le TGV), ce qui permet de contrôler le couple moteur avec un minimum de courant. On parle « autopilotage » [5].

b- Les machines asynchrones

La machine asynchrone est une machine à courant alternatif sans alimentation électrique du rotor. Le terme «asynchrone » provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément synchronisée avec la fréquence des courants qui les traversent.

La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance, notamment dans le transport (métro, trains), de l'industrie (machines-outils), dans l'électroménager, ...etc. Elles étaient à l'origine uniquement utilisées en moteur mais, toujours grâce à l'électronique de puissance, elles sont de plus en plus souvent utilisées en génératrice [7].

I.3.4. Les machines auto synchrones

Ce sont des machines synchrones dont le démarrage se fait en asynchrone et lorsque la fréquence de rotation est proche du synchronisme, le rotor s'accroche au champ statorique en se synchronisant sur la vitesse du champ magnétique. L'autopilotage (contrôle de la fréquence statorique en fonction de la vitesse rotorique) tend à faire disparaître cette technologie [7].

I.3.5. Moteurs pas à pas

Un autre genre de moteur électrique est le moteur pas à pas. Un rotor interne contenant des aimants permanents est déplacé par un ensemble d'électroaimants placés dans le stator commutés par une électronique de puissance.

mais les moteurs pas à pas à commande proportionnelle (alimentation variable des bobines) peuvent être extrêmement précis. On parle alors de « micro pas » puisque le moteur peut s'équilibrer entre deux pas.

Ces moteurs commandés par une électronique numérique sont une des formes les plus souples des systèmes de positionnement, en particulier dans les organes servocommandés numériquement: exemple, les moteurs de positionnement des têtes de lecture/écriture des disques durs d'ordinateur ont longtemps été positionnés par ce type de moteur, [8].



Figure I.2: Deux moteurs pas à pas [8].

I.3.6. Moteurs linéaires

Un moteur linéaire est essentiellement un moteur asynchrone dont le rotor a été « déroulé » de sorte qu'au lieu de produire une force de rotation par un champ électromagnétique tournant, il produise une force linéaire sur sa longueur en installant un champ électromagnétique de déplacement [8].

I.4. Les défauts des machines électriques

Les défauts classés selon leurs origines en deux catégories : interne et externe

Les défauts internes sont provoqués par les constituants de la machine (bobinages du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotorique, entrefer mécanique, etc.).

Les défauts externes sont causés par le type d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine. Une classification des défauts qui existent dans les machines électriques selon leurs origines est présentée dans le Tableau I.1 [9].

Tableau I-1 : défauts des machines électriques selon l'origine [9].

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

I.5. La nature des défauts

Les défauts des entraînements électriques se divisent en deux parties [10].

- les défauts qui se produisent dans la machine électrique (défauts des roulements, inclinaison de l'axe.. etc.)
- les défauts qui produisent dans la chaîne d'entraînement à l'extérieur de la machine électrique

I.6. Les causes des défauts

Il existe de nombreux défauts dans les machines électriques et ils sont variés et peuvent être classés en trois groupes:

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

Donc la majorité de tous les défauts du rotor et du stator sont provoqués par une combinaison des divers efforts qui agissent sur ces deux composants de la machine.

Pour le stator, ces efforts peuvent être groupés comme suit [10] :

- Efforts thermiques (vieillessement, surcharge, cycle de démarrage fréquent et coupures).
- Efforts mécaniques (mouvement d'enroulement et excentricité du rotor).
- Efforts électriques (diélectrique, surtension et l'effet de couronne).

I.7. Les types des défauts

Généralement, il existe plusieurs types des défauts tels que :

I.7.1. Déséquilibre massique des rotors. Balourds

La principale raison du déséquilibre est la vibration. Il s'agit d'un déséquilibre qui se produit lorsque l'axe des centres de gravité du rotor ne coïncide pas avec l'axe de rotation. L'axe des centres de gravité est défini comme une ligne joignant les centres de gravité de tranches minces fictives dont l'alignement formerait le rotor. La figure (I.3) illustre un quelques causes de balourd dans un rotor. [11].

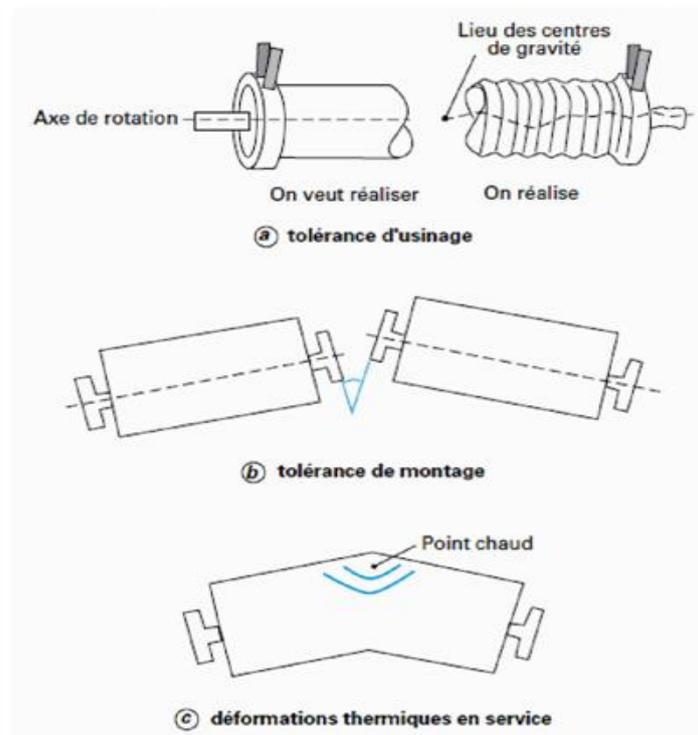


Figure I.3: Quelques causes de déséquilibres (ou balourds) [11].

Une raison courante des changements temporaires de déséquilibre est l'a récure transitoire du rotor sous l'effet des contraintes thermiques qui sont générées lorsqu'un côté de l'arbre est plus chaud que le côté opposé. On peut désigner :

a-Déséquilibre statique

Ce déséquilibre agit aussi s'il n'y a pas de rotation, on l'appelle alors "déséquilibre statique". Il provoque un déplacement du centre de la masse en dehors du plan géom. durant son utilisation, le rotor oscille par rapport à son axe de rotation [11].

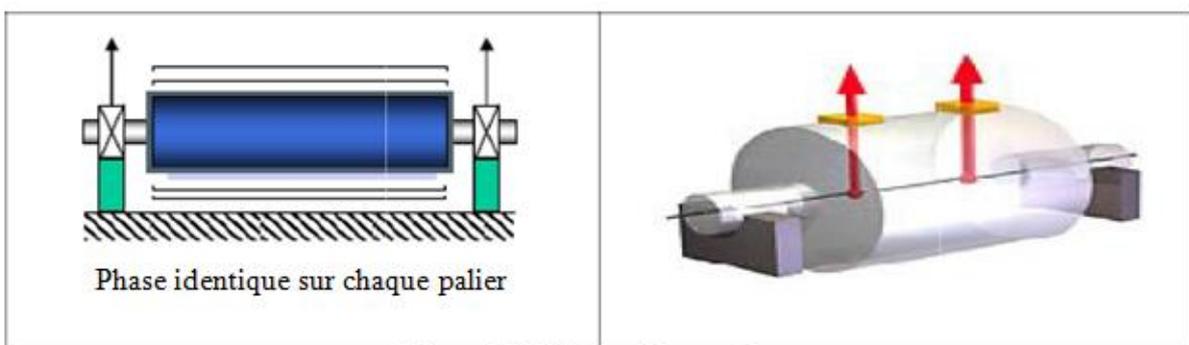


Figure I.4 : Déséquilibre statique [11].

b-Déséquilibres de couple

Le déséquilibre ne peut pas être déterminé par oscillation, car le rotor n'accepte plus aucune position stable. Ce qui donne un mouvement de saut autour de son axe, car les deux déséquilibres déclenchent un couple. Par conséquent, cette sorte de répartition du déséquilibre est indiquée comme un déséquilibre de couple [11].

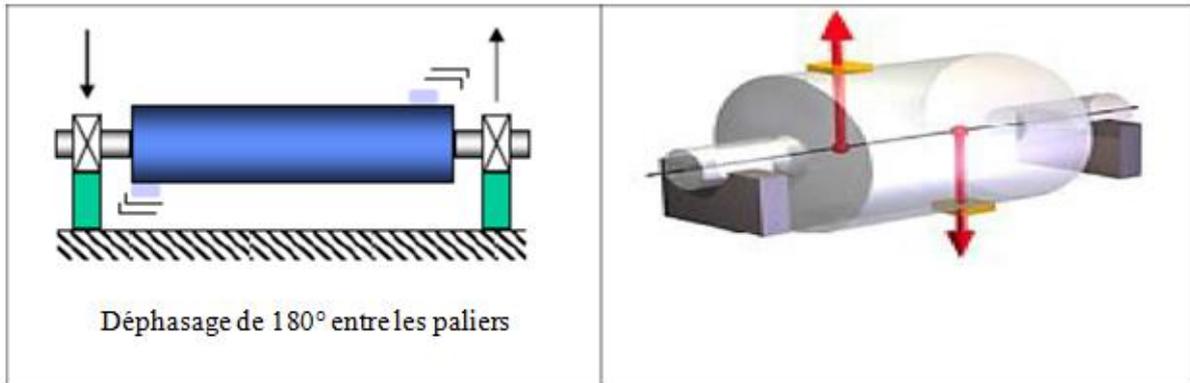


Figure I.5 : Déséquilibres de couple [11].

c- Déséquilibres dynamiques

On peut dire ça Le rotor réel possède non seulement un déséquilibre indépendant, mais théoriquement plusieurs autres qui sont répartis arbitrairement le long de l'axe de rotation. Ceux-ci peuvent être remplacés par deux déséquilibres résultants (comme ici, représentés par les flèches) dans deux plans quelconques qui ont en général des intensités diverses et des positions angulaires différentes. Puisque ce non-état d'équilibrage ne peut être établi complètement que pendant la rotation, on parle d'un déséquilibre dynamique, il est nécessaire d'avoir deux plans de compensation. Le déséquilibre dynamique se produit pratiquement sur tous les rotors. C'est pourquoi, on emploie, pour effectuer l'équilibrage, des machines à équilibrer verticales aussi bien qu'horizontales [11].

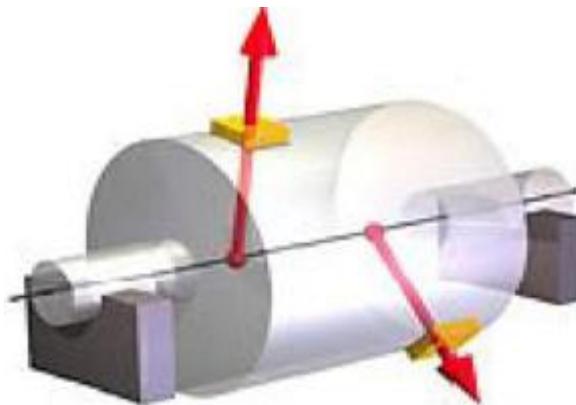


Figure I.6: Les déséquilibres dynamiques

Conclure que les origines de différents types de balourds sont:

-Balourd d'origine mécanique

Lorsque vous êtes une masse de matière qui se détache du rotor ou vient se déposer sur ce dernier (perte d'ailette ou rupture d'une aube, érosion ou dépôt de matière, fluage du rotor), on observe instantanée des vibrations [8].

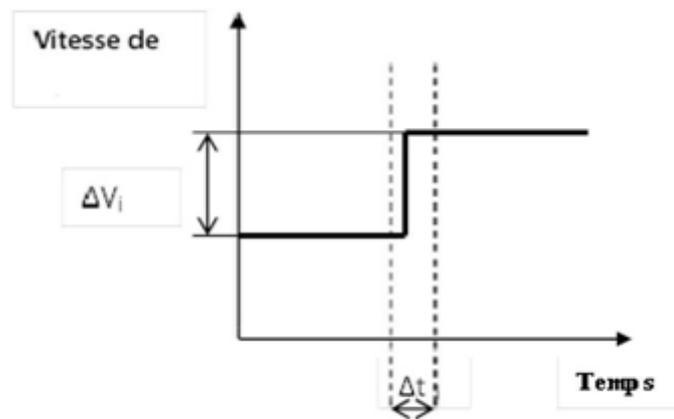


Figure I.7 : Evolution brutale de la vibration du balourd

- Balourd d'origine thermique

Quand une différence de cycles se produit, je veux dire (Lorsque les rotors ne sont pas homogènes), la température n'est pas répartie de façon uniforme, les rotors se déforment sous l'effet de contraintes thermiques (Déformation des rotors de turbine.). S'ils se déforment de façon dissymétrique, les centres de gravité se déplacent et les efforts varient. Le critère de diagnostic repose alors sur la corrélation entre les variations de température et l'évolution des vibrations. La rapidité de l'évolution renseignera sur l'origine du défaut.

-Balourd évolutif (Balourd créé par l'échauffement):

[Si au passage par un orifice (palier, joint d'étanchéité par exemple) l'arbre s'échauffe de manière dissymétrique, soit parce qu'il frotte, soit parce que le brassage d'huile provoque un échauffement plus intense d'un côté de l'arbre que de l'autre., la déformation de l'arbre qui résulte de cet échauffement déplace à son tour le point chaud (vibration maximum décalée par rapport au point chaud qui lui donne naissance) alors, toutes les conditions sont réunies pour amorcer un phénomène de variations cycliques du déséquilibre 11].

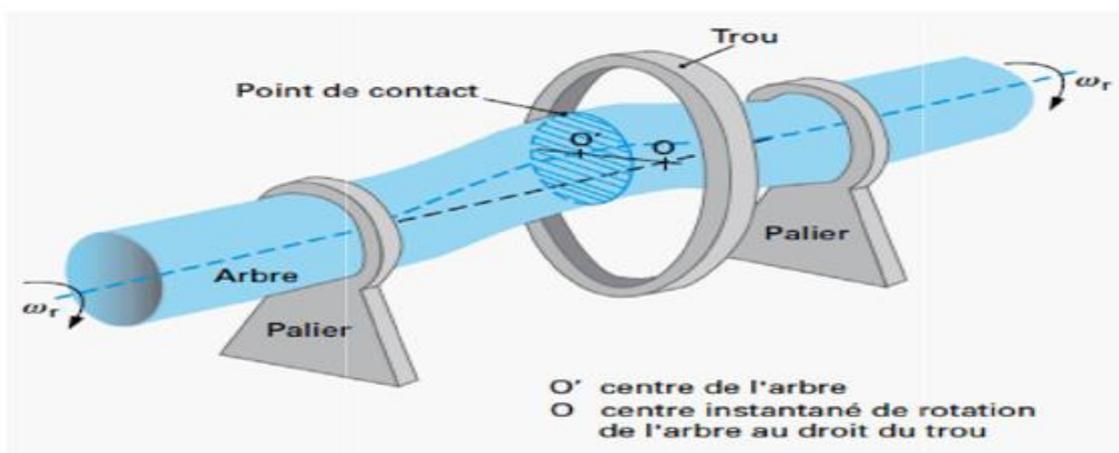


Figure I.8 : frictions de frottement-échauffement (rotor / parties fixes)

I.7.2. Défauts des roulements

Les roulements sont une source fréquente de défaillance. Les défauts que l'on peut y rencontrer sont les suivants : écaillage, grippage, corrosion (qui entraîne l'écaillage)...etc.

Ils se rencontrent et partagent un défaut: ils se traduisent tôt ou tard par une perte de fragments de métal. Ce défaut consécutif de la destruction est l'écaillage. Il se traduit par des chocs répétés des billes sur la cage de roulement [11].

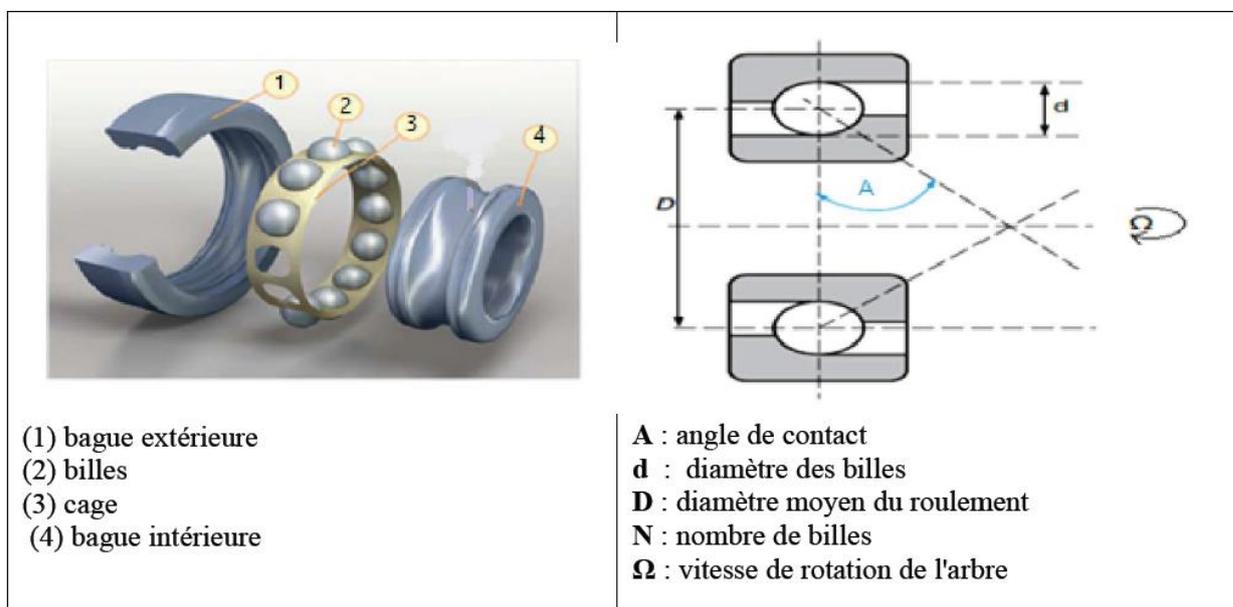


Figure I.9: Principaux éléments d'un roulement à billes [11].

Les fréquences théoriques liées aux défauts sur chaque élément tournant s'écrivent :

I.7.2.1. Défaut sur la bague extérieure

Ce type de défaut est présenté par la figure (I.9) et la fréquence de défaut de la bague extérieure est donnée par la formule suivante:

$$F_{b_{ext}} = 0.5 F_r n \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha \right) \right] \tag{I-01}$$



Figure I.10: Défaut sur la bague extérieure [11].

I.7.2.2. Défaut sur la bague intérieure

Le défaut sur la bague intérieure est montré sur la figure (I.10) et la fréquence de ce type de défaut est exprimée par la relation suivante :

$$F_{b_{int}} = 0.5 F_r n \left[1 + \left(\frac{d}{D} \cos \alpha \right) \right] \tag{I-02}$$



Figure I.11: Défaut sur la bague intérieure [11].

I.7.2.3. Défaut sur la cage

La figure (I.11) présente le défaut sur la cage et la fréquence de ce défaut est donnée par la relation suivante :

$$F_{cage} = 0.5 F_r \left[1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right] \tag{I-03}$$



Figure I.12 : Défaut sur la cage [11].

I.7.2.4. Défaut sur la bille

On peut exprimer la fréquence de défaut sur la bille par la formule ci-dessous et la figure (I.12) représente ce type de défaut :

$$2F_{bille} = F_r \frac{D}{d} \left[1 - \left(\frac{d \cos \alpha}{D} \right)^2 \right] \quad (I-04)$$



Figure I.13: Défaut sur la bille [11].

I.7.2.5. Durée de vie d'un roulement

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \cdot n} \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

(I-05)

Avec:

P : charge dynamique équivalente

C : charge dynamique de base en (N)

N : vitesse de rotation en tr/m

Pour assurer une durée de vie optimale, les bagues d'un roulement doivent être parfaitement alignées, c'est-à-dire que l'angle formé par les axes des bagues intérieure et extérieure doit être nul. En pratique, il existe toujours un certain défaut d'alignement entre l'arbre et le logement. . Le défaut d'alignement provoque une distribution de contraintes non uniforme le long de la ligne de contact rouleau/chemin de roulement, voire des contraintes aux extrémités des rouleaux qui réduisent considérablement la durée de vie d'un roulement de manière plus ou moins importante selon son type :

- les roulements dits rigides (roulements rigides à billes, roulements à rouleaux cylindriques), les butées à billes ou à rouleaux cylindriques
- les roulements à alignement automatique (roulements à rotule sur billes ou sur rouleaux, butées à rotule sur rouleaux) sont capables de compenser les défauts d'alignement. Les valeurs maximales admissibles sont données pour chaque type de roulement par les constructeurs. [12].

I.7.3.Défaut d'Engrenages

I.7.3.1. Engrenage

Parmi les mécanismes importants, basiques et les plus courants de transmission d'une transmission, il y a un engrenage et, pour cette raison, et adapter les vitesses de rotation entre organes moteurs et récepteurs. Il est constitué de deux roues dentées mobiles autour d'axes de rotation, et dont l'une entraîne l'autre par l'action de dents successivement en contact.

Les engrenages sont exposés à de nombreux défauts car il s'agit de l'un des composants cinématiques sensibles, et des défauts apparaissent pendant le fonctionnement pour plusieurs raisons. Indépendamment des erreurs de fabrication et d'assemblage, nous distinguons les deux classes d'erreurs les plus importantes [13].

I.7.3.2.Défauts généralisés

a- Usure abrasive

Phénomène présent sur une grande partie de la denture se caractérisant par un enlèvement de matière dû au glissement des deux surfaces en contact, ainsi qu'à la présence d'éléments abrasifs dans le lubrifiant. Elle peut être normale, inversement proportionnelle à la dureté superficielle de la denture, ou anormale lorsque le lubrifiant est pollué de Particules abrasives ou corrosives. Elle conduit à un mauvais fonctionnement voir à une mise hors service [13].



Figure I.14:Usure abrasive "Engrenages"[13].

b- Puttings ou piqûres

Ces trous apparaissent principalement sur les engrenages en acier de construction rigides et affectent toutes les dents Cette avarie peut apparaître à la suite de légers désalignements d'axes par exemple, à cause de surpressions locales [11].



Figure I.15: Putting ou piqûres "Engrenages"[11].

I.7.3.3.Défauts localisés

a-Écaillage

Ce phénomène se produit dans un plus petit nombre de trous par rapport à la situation en raison de la détérioration de la fatigue dans la couche inférieure à la pointe de l'extrémité, mais il est plus profond et plus spacieux Ce phénomène rencontré le plus souvent dans les engrenages cémentés, évolue très rapidement vers la rupture, sans passer par une phase d'usure [13].

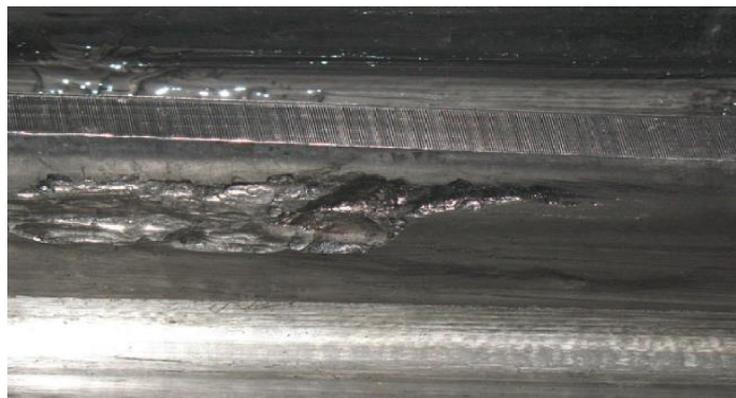


Figure I.16: Ecaillage "Engrenages"[13].

b-Fissuration

Généralement au pied de la dent, elle progresse à chaque mise en charge. Son apparition est due à un dépassement de la limite élastique en contrainte au pied de dent, du côté de la dent en traction [13].

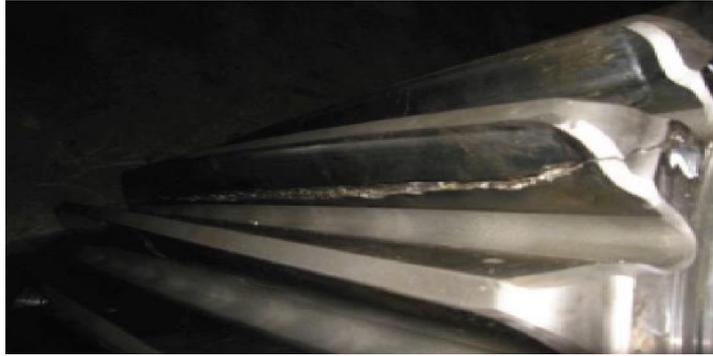


Figure I:17.Fissuration ou cracks "Engrenages"[13].

c-Grippage

Conséquence directe d'une destruction brutale du film d'huile, ou d'un frottement sous charge provoquant des hausses de températures. Le grippage est favorisé essentiellement par des vitesses élevées, de gros modules, un faible nombre de dents en contact [13].

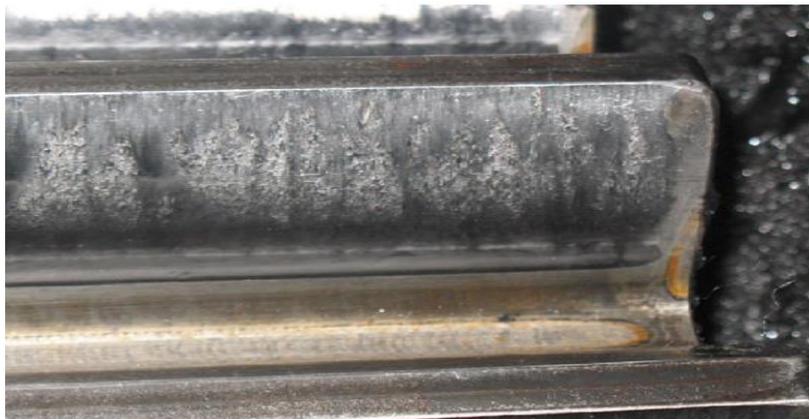


Figure I.18 : Le grippage "Engrenage"[13].

I.7.4.Excentricité

La déflexion excentrique de la machine électrique est un phénomène qui se développe dans le temps. La déflexion provoque l'annulation de la partie mobile proportionnellement à la partie fixe, et donc deux raisons :

- 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 [14- 15].

Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées :

- 1- L'excentricité statique (Figure I.19(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.
- 2- L'excentricité dynamique (Figure I.19(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. Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes.
- 3- L'excentricité mixte (Figure. I.19. (c)) – la somme des deux cas présentés ci-avant [16].

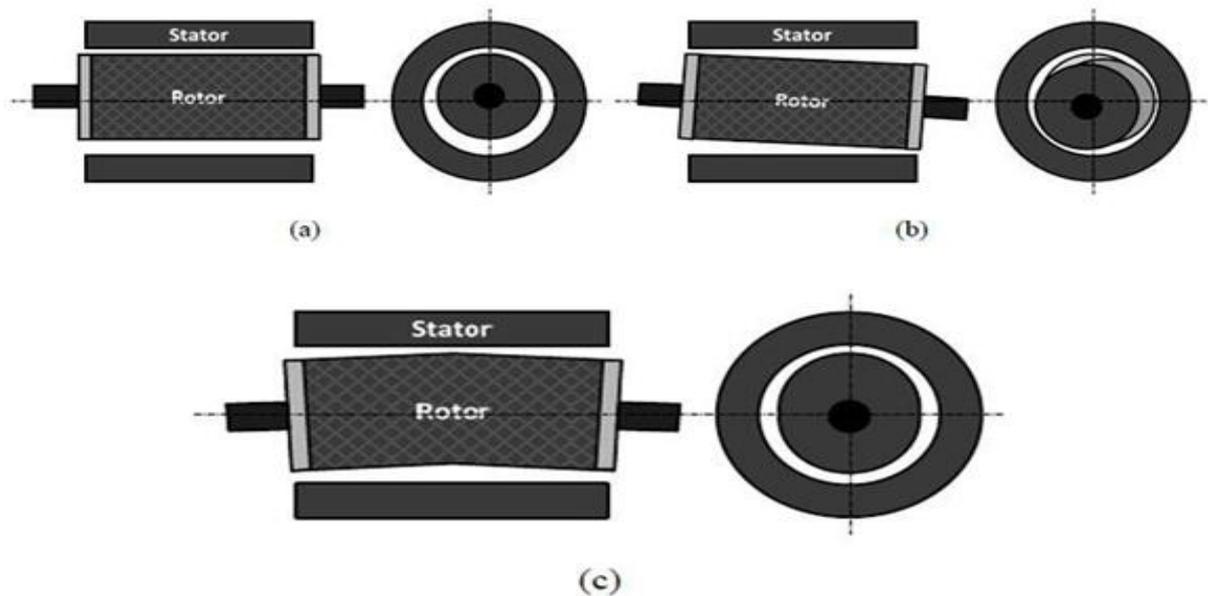


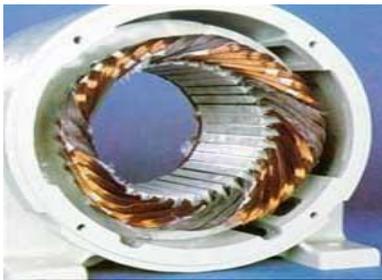
Figure I.19 Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte [16].

I.7.5 Défaits statoriques

L'apparition d'un dysfonctionnement dans le stator de la machine asynchrone a des origines différentes. Parmi eux, nous mentionnons des erreurs d'isolement dans le fichier. Les différentes causes de ce type d'erreur sont:

- Dégradation de l'isolant à la fabrication.
- Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.

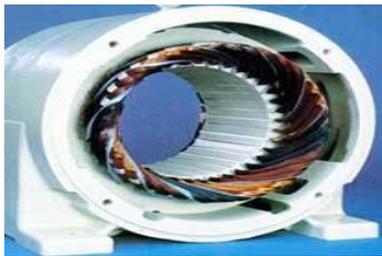
- Vibrations mécaniques.
- Vieillesse naturelle des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation ‘normale’, l’isolant finit naturellement par se dégrader.
- Fonctionnement dans un environnement sévère.



Ouverture dans une phase de l'alimentation



Courts-circuits entre – phase



Déséquilibre de l'alimentation



Endommagement dû à la surcharge



Masse dans l'encoche



Dégradation causée par une surtension

Figure. I.20 - Différents défauts statoriques de la machine asynchrone [17].

Il y a des dysfonctionnements entre les tours courts qui apparaissent à l'intérieur des trous du stator. Ce type d'erreur se produit en raison de la détérioration de l'isolation des enroulements du stator. Provoquant une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée.

On peut également citer les Courts-circuits qui apparaissent entre la phase et le neutre, ou entre la phase et le bâti métallique d'une machine, ou entre deux phases du stator.

Le plus souvent, ces défauts ont une origine mécanique. En effet, les vibrations excessives peuvent desserrer les vis de la plaque à bornes de la machine et ainsi créer un court-circuit.

Une extrémité libre à la jonction du câble d'alimentation et des bornes de la machine peut provoquer une ouverture de phase. Le fusible de protection est toujours le fusible de protection le plus courant.

Ces défauts peuvent être détectés par une analyse harmonique des courants absorbés par la machine [17] [18].

I.7.6 Défauts rotoriques

Les défauts du rotor se situent au niveau de la cage ou au niveau de l'entrefer :

- ✚ Au niveau de la cage, les défauts se résument à l'arrachement des tiges de la cage ou à l'arrachement des anneaux de court-circuit.
- ✚ Au niveau de l'entrefer, les défauts se manifestent par une déflexion statique, dynamique ou mixte.

a - Ruptures de barres

Cassure ou la rupture de barre est l'une des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine. Ainsi le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées [18].

b - Ruptures d'anneaux

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé,

voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité.) ou une surcharge de couple et donc De courants, peuvent entraîner leur cassure.

La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques [18].

C - Excentricité statique, dynamique et mixte

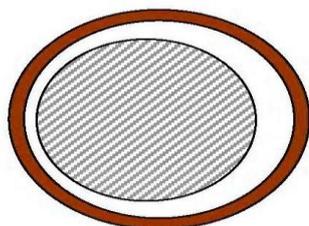
La machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor).

Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) son origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut de roulement (usure), à un défaut de charge ou à un défaut de fabrication [19].

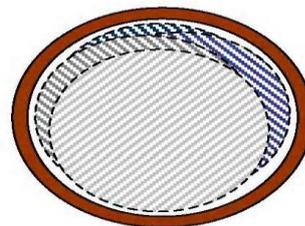
Trois cas d'excentricités sont généralement distingués :

- l'excentricité statique : le rotor est déplacé du centre de l'alésage mais tourne toujours autour de son axe.
- L'excentricité dynamique : le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.
- l'excentricité mixte : associant les deux cas, statique et dynamique.

On peut représenter l'excentricité statique et dynamique de la manière suivante



Excentricité statique



Excentricité dynamique

Figure. I.21 - Représentation de l'excentricité statique et dynamique [19].

Ce défaut modifie le comportement magnétique et mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromotrices, ce qui agit directement sur le noyau statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation.

D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquences des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements.

I.8. Définition de la maintenance

Selon la norme NF-X60-010 La maintenance est définie comme étant « toutes les activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management ».

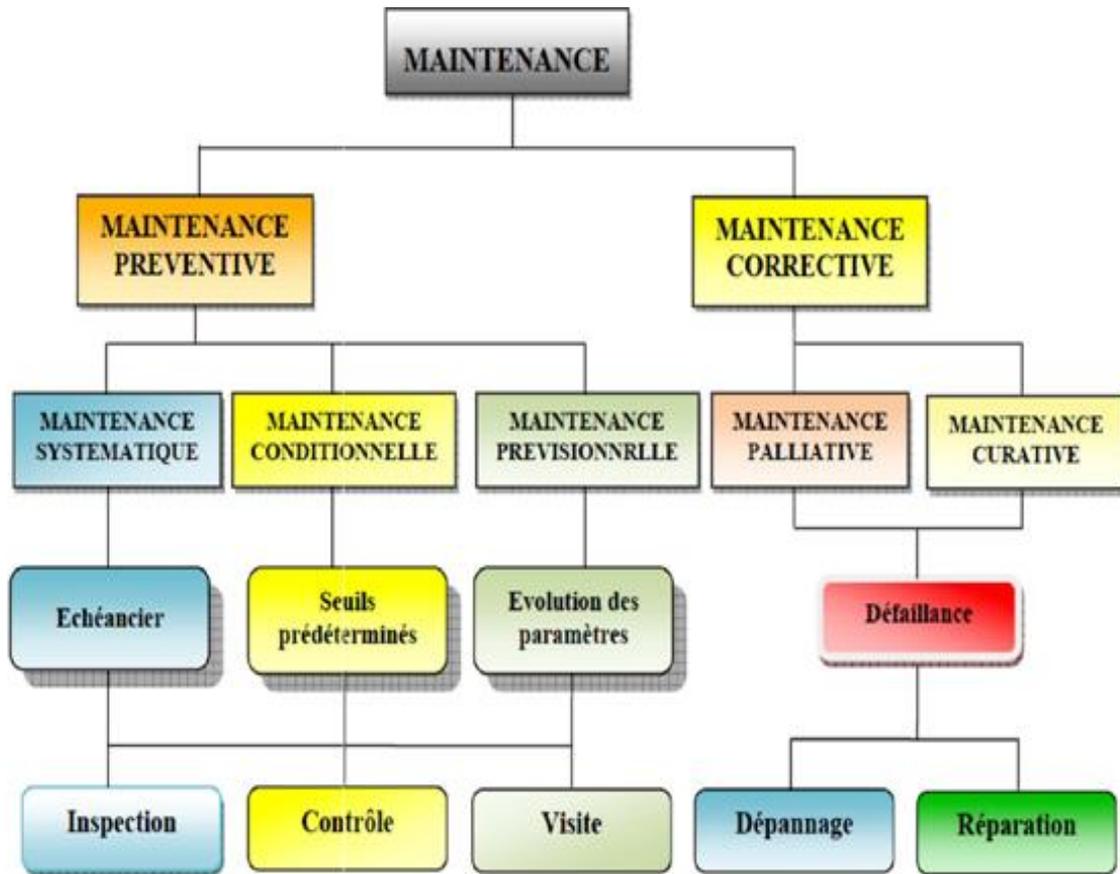
Maintenir, c'est donc effectuer des opérations (dépannage, graissage, visite, réparation, amélioration...etc.) qui permettent de conserver le potentiel du matériel, pour assurer la continuité et la qualité de la production [20].

I.9. Politique de la maintenance

Par l'utilisation des outils d'aide à la décision (ADD, AMDEC, RDP, APR) on peut choisir la politique de maintenance adéquate de tels éléments du système de production, qui permet de:

- sauvegarder le potentiel du matériel.
- programmer les travaux correctifs et préventifs dans les meilleures conditions [20].

I.10. Les différents types de maintenance



La Figure(I.22) : Les différents types de maintenance [12].

I.10.1. La maintenance corrective

D'après les normes AFNOR c'est une opération effectuée après la défaillance, destinée à rendre la santé aux machines qui l'ont perdue, c'est une maintenance pour les machines vitales de production mais qui trouve son application bien adoptée à certains matériels peu coûteux. On envisage deux types d'intervention :

- Palliative: elle est définie par l'opération de dépannage jusqu'à l'arrêt préventif
- Curative: elle est définie par l'opération de réparation pour remettre le système au fonctionnement.

La maintenance corrective basée sur deux opérations est expliquée comme suit:

a) Le dépannage

Actions physiques exécutées pour permettre à un bien en panne d'accomplir sa fonction requise pendant une durée limitée jusqu'à ce que la réparation soit exécutée. Le dépannage n'a pas des conditions d'applications particulières [20].

b) La réparation

Il est possible de décider d'appliquer la réparation soit immédiatement après un accident ou une panne, soit après une visite de maintenance préventive conditionnelle ou systématique, en raison des mesures physiques prises pour rétablir la fonction requise de l'actif défaillant [20].

I.10.2 La maintenance préventive

D'après la norme AFNOR, on peut définir cette maintenance comme une maintenance effectuée dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu [20].

I.10.2.1. Les type de maintenance préventive

a- La maintenance préventive systématique

Elle est définit comme des interventions (des opérations) effectuée selon un échancier établir selon le temps ou le nombre d'unité d'usage.

b- La maintenance préventive conditionnelle

Elle définit comme une opération subordonnée à un type d'événement prédéterminé (information d'un capteur, autodiagnostic).

c -Maintenance prévisionnelle (prédictive)

C'est une maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien. Elle permet de planifier les interventions.

I.10.2.2. Les opérations de maintenance préventive

A-Inspection

C'est l'activés de surveillance consistant à relever Périodiquement des anomalies, et d'exécution de réglages simples ne nécessitant pas d'outillage spécifique ni l'arrêt des équipements.

B- Contrôle

Il correspond à des vérifications de conformité par rapport à des données prédéterminées suivies d'un jugement. Le contrôle peut comporter une activité d'information, inclure une décision, acceptation, rejet...etc.

C- Visite

C'est l'opération de surveillance de maintenance préventive systématique qui s'opère selon une périodicité prédéterminée. Ces interventions correspondent à une liste d'organes et une immobilisation du matériel [20].

I.11.Choix de techniques d'analyse

Chaque méthode a son champ d'application privilégié. Par exemple, l'analyse vibratoire convient aux défauts liés à la cinématique et à la structure de la machine, mais dans une plage de fréquences déterminées (situées généralement entre quelques Hertz et plusieurs dizaines de KHZ). Elle couvre aussi les défauts spécifiques aux roulements (à plus hautes fréquences). Au-delà de 20 KHZ, il est souvent préférable d'utiliser un contrôle par ultrasons ou par émission acoustique. L'analyse acoustique se limite à la détection de bruits dans les fréquences audibles, mais lorsque la dégradation d'un roulement se manifeste en une fréquence audible, il est souvent trop tard pour intervenir. L'analyse d'huile consiste principalement à analyser les particules présentes dans l'huile, ce qui va révéler une usure anormale d'un ou plusieurs organes. Elle doit être appliquée dans le cas de machines où l'huile joue un rôle primordial et lorsque l'analyse des débris d'usure est significative [12].

Le tableau (I.2) résume les principaux avantages, limitations et champs d'applications de ces techniques d'analyse.

Tableau I.2:Techniques d'analyse de l'état d'une machine tournante [12].

	Principaux avantages	Principales limitations	Champ d'applications privilégié
Analyse vibratoire	<ul style="list-style-type: none"> - Détection de défauts à un stade précoce. - Possibilité de réaliser un diagnostic approfondi. - Autorise une surveillance continue. - Permet de surveiller l'équipement à distance (télémaintenance) 	<ul style="list-style-type: none"> - Spectres parfois difficiles à interpréter - Dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuses 	Détection des défauts de tous les organes cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc.) et de sa structure
Analyse d'huiles	<ul style="list-style-type: none"> - Détection d'une pollution anormale du lubrifiant, avant que celle-ci n'entraîne une usure ou un échauffement. - Possibilité de connaître l'origine de l'anomalie par analyse des particules 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne permet pas de localiser précisément le défaut. - Nécessite de prendre de nombreuses précautions dans le prélèvement de l'échantillon 	Contrôle des propriétés physico-chimiques du lubrifiant, détection d'un manque de lubrification, analyse des éléments d'usure.
Thermographie IR	<ul style="list-style-type: none"> - Permet de réaliser un contrôle rapide de l'installation. - Interprétation souvent immédiate des résultats. 	<ul style="list-style-type: none"> - Détection de défauts à un stade de moins précoce que l'analyse vibratoire. - Contrôle limité à ce que "voit" la caméra (échauffements de surface). - Ne permet pas de réaliser un diagnostic approfondi. 	Détection de tous les défauts engendrant un échauffement (manque de lubrification en particulier).
Analyse acoustique	<ul style="list-style-type: none"> - Permet de détecter l'apparition de défauts audibles. - Autorise une surveillance continue. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilité au bruit ambiant. - Diagnostic souvent difficile à réaliser. - Problèmes de répétabilité des mesures. 	Détection d'un bruit inhabituel pouvant ensuite être analysé par analyse vibratoire

Il n'existe pas de méthode universelle permettant de détecter de manière assez précoce tous les types de défauts que l'on est susceptible de rencontrer sur une machine tournante mais la combinaison et l'association de plusieurs méthodes permet un diagnostic plus fiable et plus rapide. La surveillance des machines ne se limite pas juste à détecter la présence d'un défaut, mais il est aussi nécessaire de pouvoir réaliser un diagnostic approfondi pour le localiser précisément et quantifier sa sévérité. [21].

I.12 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons défini la machine électrique et vu leurs classifications, ensuite; on a présenté les natures et les causes de défauts des machines électriques, Il existe plusieurs défauts de ces machines tels que les défauts électriques et les défauts mécaniques. Pour détecter ces défauts, il faut utiliser un outil qui nous permet de connaître la nature et le type de défauts, pendant que vous La maintenance des équipements joue un rôle très important dans le domaine industriel à travers leur influence sur la production, nous avons fait une vue générale sur la maintenance.

CHAPITRE II

Méthodes de diagnostic pour machines électriques

II-1- Notion diagnostic d'un système

Le diagnostic d'un système est l'identification du mode de fonctionnement à chaque instant par ses manifestations extérieures. Il consiste à identifier la cause probable de la défaillance d'un ou de plusieurs paramètres significatifs de dégradations à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'information [22].

II.1.1 Généralités

Les systèmes industriels modernes sont de plus en plus complexes. En effet, la fiabilité, la disponibilité et la sûreté de fonctionnement sont devenues très importantes.

Le diagnostic des systèmes est apparu dans le but d'améliorer les points précédents et est devenu un sujet d'importance stratégique. Toutes branches confondues, les procédés industriels sont couplés à un ordinateur numérique qui ne se contente pas de faire que l'acquisition. L'objectif du diagnostic est d'augmenter la performance du système, de garantir la qualité de production, et de diminuer les coûts de fabrication ainsi que l'amélioration de la sécurité de l'installation et des hommes qui y travaillent [22].

II.1.2 Procédure de diagnostic

Dans la procédure de diagnostic, on distingue deux étapes principales : la détection et la localisation des défauts et en plus l'identification dans certaines méthodes.

Dans un équipement industriel, lorsqu'un défaut apparaît le système de diagnostic détecte l'anomalie puis identifie la cause pour qu'il puisse être isolé. L'organisation de la procédure de diagnostic de défaut d'un système est la suivante [22]:

- Extraction des informations nécessaires,
- Elaboration des signatures associées aux symptômes des défauts,
- Détection de dysfonctionnements,
- Mise en œuvre de la méthode de diagnostic,
- Interprétation des données,
- Prise de décision en fonction des conséquences et de l'importance des défauts

II.1.3 Types de défauts

Une modification suffisamment importante et permanente des caractéristiques physiques d'un système ou d'un composant peut être la conséquence de défauts et un défaut est une cause probable d'erreur pour un fonctionnement donné. Le système défaillant est incapable d'accomplir correctement ses ou ses fonctions avec les performances requises et les défauts apparaissent dans différents endroits du système [22].

Les défauts sont classés en fonction de leur localisation:

- les défauts actionneurs,
- les défauts procédés,
- Les défauts capteurs

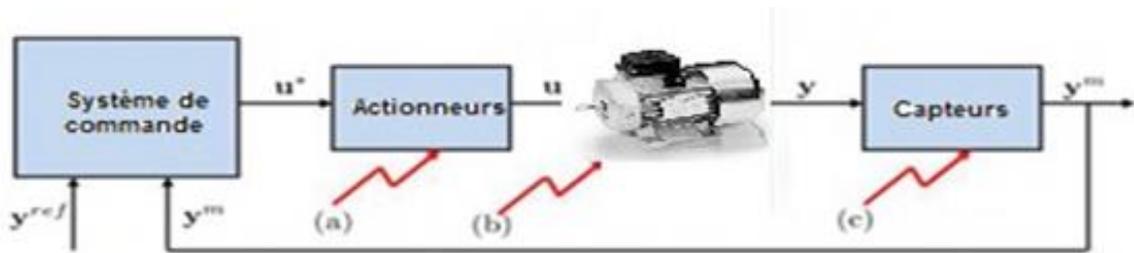


Figure II.1: Composition d'un système industrielle [22].
 (a) actionneurs (b) installations/processus (c) capteurs

Pour reconnaître la présence de l'un des trois types de défaut, il faut des connaissances approfondies de l'installation dont la connaissance de son comportement sain défaillant [22].

II.1.3.1 Défauts actionneurs

Les défauts actionneurs agissent au niveau de la partie opérative et détériorent le signal d'entrée du système. Ils représentent la perte totale ou partielle d'un actionneur agissant sur le système. [22].

II.1.3.2 Défauts procédés

. Un défaut procédé résulte de la casse d'un composant du système et réduit les capacités de celui-ci à effectuer une tâche. En pratique [22].

II.1.3.3 Défauts capteurs

Le défaut capteur engendre une mauvaise image de l'état physique du système. Il existe deux types de défauts capteurs qui sont le défaut capteur partiel et le défaut capteur total [22].

II.2 Quelques Définitions [22].

— **Le diagnostic** : désigne, dans le domaine des sciences de l'ingénieur, l'analyse des mauvais fonctionnements, défauts ou défaillances d'un système afin d'en déterminer la nature et la cause.

— **La surveillance** : La surveillance est une tâche continue et en temps réel pour déterminer l'état d'un système. Elle se fait grâce à un enregistrement des informations pouvant indiquer la survenue d'éventuelles anomalies dans le comportement du système.

— **La supervision**: La supervision est généralement définie comme l'exécution d'une opération ou d'un travail accompli par d'autres agents (hommes ou machines), sans rentrer dans les détails de cette exécution. La Supervision du fonctionnement d'installation industrielle est devenue le rôle principal des opérateurs humains, les systèmes automatiques assurant localement le contrôle et la commande.

- **Signatures:** Contiennent les informations jugées pertinentes par les experts des matériels pour la détection d'une défaillance. La complexité des signatures dépend de la nature des systèmes à diagnostiquer et varie en fonction de l'anomalie recherchée : défaillance ou dégradation
- **Anomalie :** Particularité non conforme à la loi naturelle ou à la logique.
- **Dégradation :** C'est une perte de performances d'une des fonctions assurées par un équipement.
- **Faute :** Action, volontaire ou non, dont le résultat est la non prise en compte correcte d'une directive, d'une contrainte exprimée par le cahier des charges.
- **Panne :** C'est l'inaptitude d'une entité à assurer une fonction requise.
- **Perturbation :** Ecart entre le comportement d'un système physique et une référence dont l'origine n'est pas considéré comme une anomalie. De plus, perturbation et défauts sont de même nature, la différence entre les deux tient au caractère normal ou anormal du comportement des systèmes physiques.
- **Défauts :** De manière générale, un système industriel est composé de trois parties les actionneurs, le processus (installation) et les capteurs.

Un défaut peut être défini comme une modification suffisamment importante et permanente des caractéristiques physiques d'un système ou d'un composant. Un système défaillant (qui subit un défaut) est incapable d'accomplir correctement sa ou ses fonctions avec les performances requises Les défauts peuvent survenir sur chacune de ces trois parties.

II.3.Caractérisation de défauts

Les défauts peuvent être caractérisés selon leur comportement. Ainsi, ils peuvent être brusques, intermittents ou graduels, additifs ou multiplicatifs [22].

- **Défaut brusque :** Ce type de défaut apparaît à un instant (t) et est d'une amplitude constante non nulle. Un défaut de ce type représente des pannes brutales.
- **Défaut intermittent :** Un défaut intermittent est un cas particulier de défaut brusque. Il s'agit d'un défaut imprévisible. Par conséquent, le caractère aléatoire de ce défaut le rend difficile à détecter.
- **Défaut à dérive lente :** Ce type de défaut caractérise généralement des défauts d'usure contrairement aux autres défauts l'amplitude de celui-ci Ne reste pas constante. Elle augmente proportionnellement avec le temps. Ce type de défaut caractérise généralement des défauts d'usure.

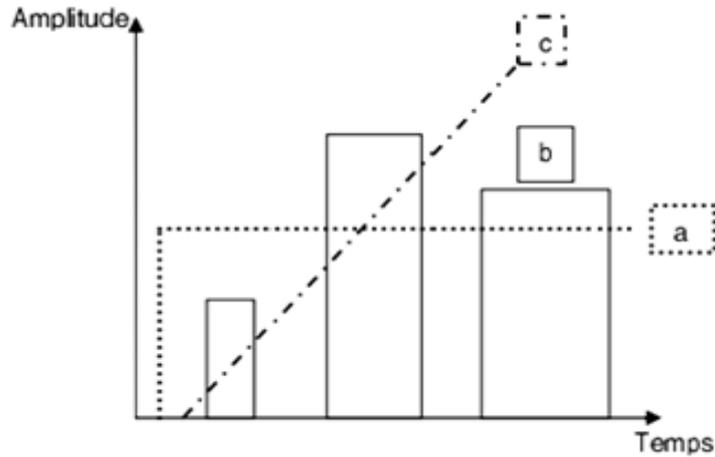


Figure II.2: Classification de défauts [22].
 (a) défaut brusque (b) défaut intermittent (c) défaut à dérive lente ou graduel

II.4 Les méthodes de diagnostic des machines électriques

Les machines électriques en particulier jouent de nos jours un rôle important dans toutes les applications industrielles. Assurer la disponibilité et la sûreté de fonctionnement de celles-ci est une tâche fondamentale. Il est donc nécessaire de développer des systèmes permettant de détecter (surveillance) et d'évaluer (diagnostic) l'état de santé de ces dispositifs [23].

II.4.1 Etat de l'art des méthodes de diagnostic

II.4.1.1 les différents types de diagnostic

Les méthodes de diagnostic sont nombreuses mais on peut les classer en trois grandes familles (Figure II.3)

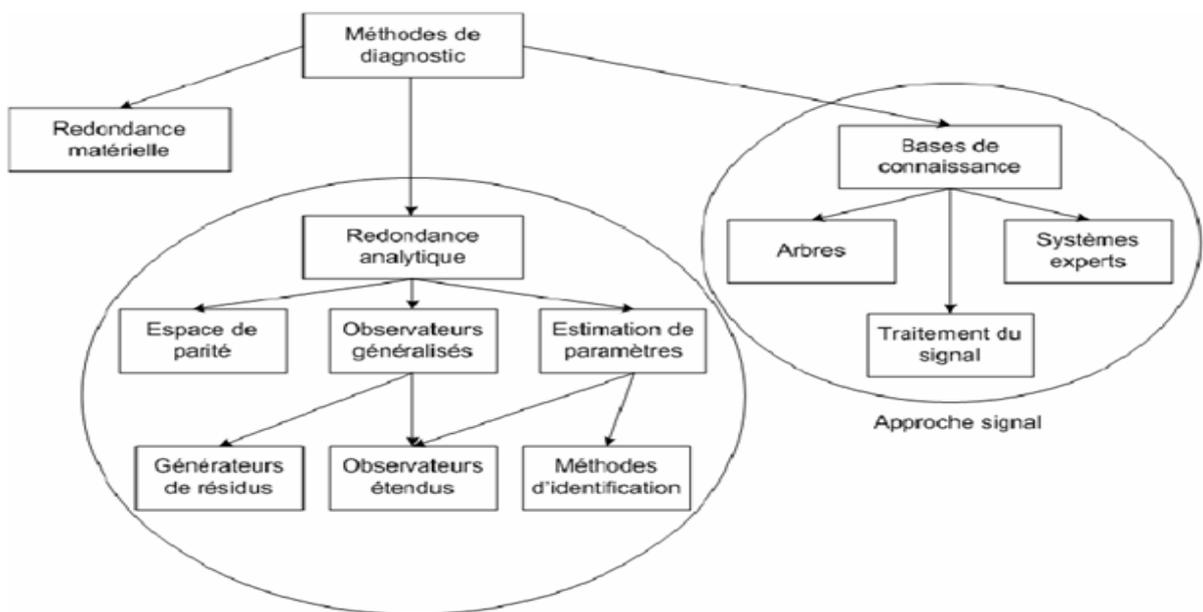


Figure II.3 : Les différentes méthodes de diagnostic [23]

- La méthode de redondance matérielle. Cette méthode est associée aux systèmes très critique où la moindre panne est inenvisageable (centrales nucléaires, aérospatiale, transport aérien,...). Il s'agit de multiplier les systèmes pour que, dans le cas d'une défaillance de l'un, un autre prenne immédiatement le relais. Si l'un des systèmes à un comportement trop éloigné des autres, il est exclu de l'ensemble [23].
- La méthode de redondance analytique. Celle-ci repose sur un modèle mathématique du système. Ce modèle comporte souvent quelques paramètres. Lors du fonctionnement, les paramètres sont estimés et comparés aux grandeurs théoriques, le différentiel étant la signature du défaut. Si ce différentiel dépasse un certain seuil, la présence du défaut est signalée à l'utilisateur [23].
- La méthode heuristique ou s'appuyant sur une base de connaissance. Elle ne nécessite pas forcément de modèle précis du système mais repose plutôt sur une reconnaissance de signatures déjà observées. Les signatures de défauts, obtenus par modélisation ou par mesure sur maquette, sont généralement classées dans une base de données. L'analyse est réalisée par une interprétation du type signal, par système expert ou par réseaux de neurones [24].

En fait, toutes ces approches sont complémentaires les unes des autres dans la surveillance des systèmes complexes (avec contrôle, commande et vitesse variable).

L'approche par système expert est plutôt dédiée à la surveillance de l'état de vieillissement. Elle est basée sur l'expertise (récupération de critères et d'indicateurs) et l'analyse est réalisée par traitement des données hors ligne pour ensuite conduire à la prise de décision. Cette approche a actuellement un coût important, elle est longue à mettre en œuvre, et les difficultés auxquelles il faut faire face sont nombreuses.

Pour des raisons de simplicité et d'efficacité, l'approche signal est très utilisée actuellement en diagnostic. Cette approche repose sur la connaissance du comportement du système sain et des défauts, elle est ensuite comparée avec les signaux mesurés. Parmi les approches existantes, les approches basées sur l'analyse de la signature spectrale sont les plus couramment rencontrées pour détecter la présence d'une anomalie [23].

II.4.2. Le diagnostic appliqué aux machines électriques

Dans le domaine des machines électriques, le diagnostic de défauts est aussi ancien que les machines elles-mêmes. Chaque famille de machines possédant des caractéristiques différentes, les méthodes de diagnostic qui leur sont associées sont également différentes.

Les machines asynchrones sont des machines fréquemment utilisées dans le milieu industriel. Leur robustesse et leur simplicité de construction dans des gammes de puissance très étendues en font actuellement les machines électriques les plus utilisées. Pour les machines de faibles puissances (et donc de faible coût), qui sont fortement utilisées dans les industries manufacturières, le diagnostic se limite souvent à une simple surveillance [23][24].

Pour les machines de fortes puissance, est donc de coûts élevés, il est nécessaire de mettre en œuvre des systèmes de surveillance beaucoup plus sophistiqués.

Pour la détection d'un dysfonctionnement de machine électrique, il est nécessaire de posséder :

- - Une bonne connaissance du comportement de la machine, de son état et de son fonctionnement.
- - Une bonne connaissance des défaillances et de leurs conséquences sur le fonctionnement de la machine.

En fait, les connaissances obtenues par l'expérimentation sont très difficiles à mettre en œuvre. La modélisation permet de s'affranchir de ces difficultés si l'on possède les modèles de machine électrique dédiés au diagnostic. En effet, les méthodes de modélisation jouent actuellement un rôle important dans la caractérisation des défaillances.

- ❖ Les méthodes de diagnostic heuristiques reposent sur l'analyse de grandeurs de type :
 - Électriques: à l'heure actuelle, la recherche de défauts est généralement effectuée sur l'analyse de grandeurs électriques que sont la tension ou l'intensité aux bornes des machines. La méthode la plus connue, et certainement la plus utilisée, est la méthode MCSA (Motors Current Signature Analysis) qui repose sur l'analyse fréquentielle des courants de phase. Celle-ci ne nécessite qu'un simple capteur de courant [23].
 - Mécanique : Les méthodes d'analyse des grandeurs électriques peuvent avantageusement être couplées à l'observation des grandeurs mécaniques utiles telles que la vitesse ou le couple. La détection de défauts par l'analyse fréquentielle de la signature des vibrations est une des méthodes les plus performantes pour le diagnostic des machines asynchrones [23] [25].

II.4.3 Méthodes de diagnostic avec modèle analytique

Ces méthodes de détection reposent sur des connaissances à priori du système. Elles supposent la connaissance des modèles et des paramètres représentant le processus physique à étudier. La comparaison des signaux expérimentaux représentant le fonctionnement du système et des signaux générés par les modèles (ou des paramètres estimés) permet la détection ainsi que l'identification de la défaillance susceptible de se produire. Ces techniques supposent la connaissance de la plage de variation de ces modèles et de ces paramètres selon les conditions de fonctionnement du système. Ces techniques peuvent être classées en trois catégories.

II.4.3.1 Techniques d'estimation d'état

Les modèles analytiques font intervenir un nombre fini de variables internes, appelés aussi variables d'état. Ces variables sont généralement non mesurables pour des raisons d'inaccessibilité, elles peuvent être dépourvues de sens physique ou le coût d'installation de capteurs est trop élevé. Comme l'évolution temporelle du système est caractérisée par l'évolution de ces variables, on a souvent recours à des techniques d'estimation (capteurs logiciels) pour suivre l'évolution de leurs valeurs. La figure II.4 présente le schéma de principe de l'estimation d'état à partir des grandeurs mesurées (les signaux d'entrée et les signaux de sortie du système).

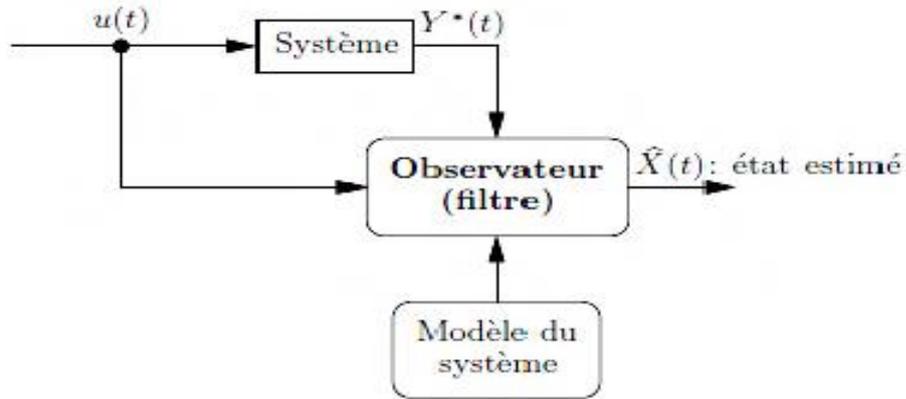


Figure II.4 : Principe de l'estimation d'état [25].

II.4.3.2 Technique de génération de résidus

Les résidus sont des signaux qui reflètent l'écart entre un modèle et le système à surveiller, comme indique par la figure II.5 ces résidus dépendent de la technique avec laquelle ils ont été générés. Ces techniques d'extraction des résidus visent à fournir des signaux significatifs et exploitables pour détecter la présence d'une défaillance spécifique.

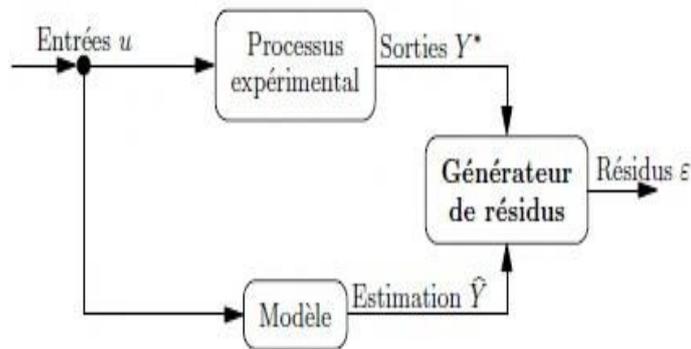


Figure II.5 : Génération des résidus [25].

II.4.3.3 Techniques d'identification

Les techniques d'identification ont pour objectif de déterminer un modèle dynamique du système à surveiller à partir de mesures expérimentales, d'entrée et de sortie. L'idée fondamentale est que les paramètres caractérisant ce modèle identifiés vont être sensibles aux défauts actant la machine, et vont donc permettre par leurs variations de caractériser ces défauts ; on trouvera dans une formalisation de ce principe.

L'estimation des paramètres du modèle est assurée par un algorithme de minimisation de l'erreur entre la sortie du modèle et celle de la machine, la figure II.6 traduit cette procédure.

Plusieurs techniques d'identification basées sur la minimisation d'un critère quadratique sont utilisables ; on peut les classer selon :

- Techniques à erreur d'équation
- Techniques à erreur de sortie
- Filtre de Kalman étendu.

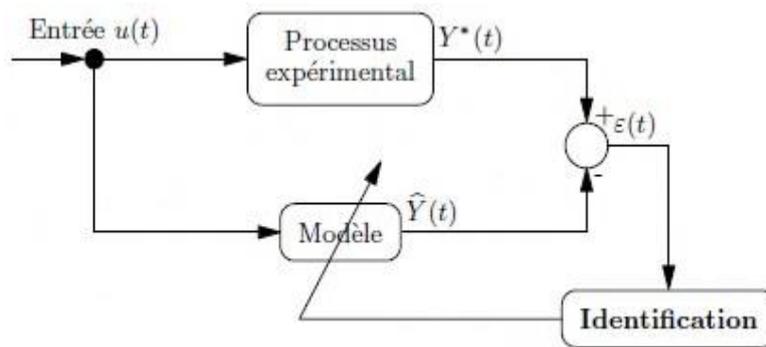


Figure II.6 : Principe des techniques d'identification [25].

II.4.3.4 Méthodes de diagnostic sans modèle analytique

Ces méthodes ne nécessitent pas forcément de modèle précis du système mais reposent plutôt sur une reconnaissance de signatures. Les signatures de défauts, obtenues par modélisation ou par mesure sur maquette, sont généralement classées dans une base de données. Les défauts, étudiés par ces méthodes de diagnostic sont :

- Les ruptures de barres ou de portions d'anneaux au rotor,
- L'excentricité statique et dynamique,
- La défaillance des paliers,
- Le court-circuit entre spires au stator.

II.4.3.5 Méthode par traitement de signal

L'approche signal est très utilisée actuellement en diagnostic. Cette approche repose sur la connaissance du comportement du système sain, elle est ensuite comparée avec les signaux mesurés. Les méthodes courantes d'analyse des signaux de diagnostic en régime transitoire et en régime permanent sont l'analyse spectrale, le spectrogramme, l'analyse temporelle et la distribution de Wigner-Ville.

Les approches basées sur l'analyse de la signature spectrale sont les plus couramment rencontrées pour détecter la présence d'une anomalie. Le principal défaut de l'analyse spectrale est qu'elle est très sensible à la qualité de la mesure, ainsi qu'à la fréquence d'échantillonnage et au nombre d'échantillons. Les procédures de surveillance de fonctionnement sont généralement orientées vers des défaillances spécifiques intervenant sur l'une des trois parties de la machine : le stator, le rotor ou les paliers.

II.4.3.6 Méthode par intelligence artificielle (IA)

L'intelligence artificielle est de plus en plus utilisée dans le domaine de la supervision et du diagnostic, elle a permis d'augmenter l'efficacité et la fiabilité du diagnostic. Dans le domaine de la supervision des machines électriques, les industriels et les chercheurs ont de plus en plus recours à ce genre de technique pour augmenter l'efficacité du système.

En fait, le terme « Intelligence Artificielle » comprend diverses techniques telles que les systèmes experts, les réseaux de neurones, la logique floue, qui peuvent être utilisés de manière indépendante ou combinés pour améliorer leur efficacité. Ces méthodes sont intéressantes même si elles nécessitent une phase d'apprentissage initial qui est critique pour un fonctionnement optimal. La phase d'apprentissage nécessite un ensemble important d'exemples comme elle peut être trompeuse ou peut produire des résultats limités à un ensemble de systèmes

a- Les réseaux de neurones artificiels

Imitent la structure neuronale d'un cerveau humain. Ils sont formés par un réseau complexe de blocs arithmétiques simples. Ils peuvent facilement représenter les systèmes non linéaires multi-entrées/multi-sorties. Cette technique a largement été utilisée dans le domaine du diagnostic des machines électriques selon plusieurs démarches et techniques:

- apprentissage à partir de signaux temporels ou fréquentiels issus de simulation ou d'expérimentation.
- diagnostic en temps réel et autonome.
- mise à jour dynamique de la structure du réseau.
- filtrage des transitoires, des perturbations et du bruit.
- détection des défauts dès leur naissance.

b- La logique floue

Traduit la perception humaine des valeurs, elle ne se limite pas à des valeurs "vrai, faux" comme la logique traditionnelle. Elle offre une large fourchette de valeurs intermédiaires. Les systèmes flous sont capables de traiter des variables naturelles via des conditions floues "si-alors". Les systèmes flous adaptatifs exploitent les facultés d'apprentissage des réseaux de neurones ou la robustesse des algorithmes génétiques dans le domaine de l'optimisation des paramètres du système à étudier, afin de prendre en considération les connaissances a priori et l'expertise humaine dans le domaine. Nous pouvons trouver dans la littérature. Plusieurs articles exploitant cette technique dans le domaine du diagnostic et de la surveillance des machines électriques, avec des objectifs variés :

- Détection d'un fonctionnement anormal et localisation de la défaillance.
- évaluation des indices de performance.
- construction de bases de données issues de l'expertise humaine, et formulation sous forme de règles conditionnelles " si-alors ".
- Conception de systèmes adaptatifs pour le diagnostic.

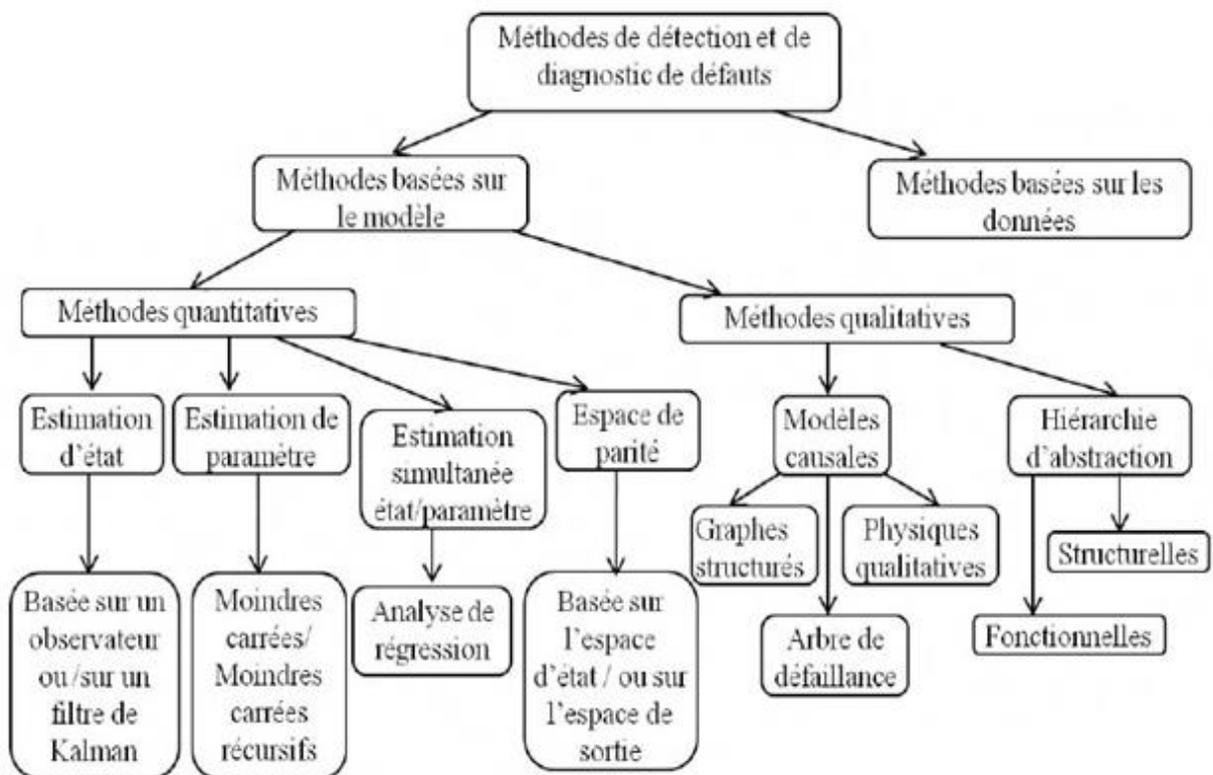
c- La technique neuro-floue

Est là des deux techniques précédentes qui sont très intéressante pour le diagnostic et la surveillance de machines asynchrones. En effet, les réseaux de neurones adaptatifs peuvent Générer le système flou correspondant d'une manière autonome. Cette génération des règles est faite à partir des exemples d'apprentissage, en minimisant ainsi l'intervention de l'expert lors de la formulation des règles conditionnelles. L'application de l'IA est d'une grande aide dans l'automatisation de la procédure du diagnostic, elle permet de profiter de l'expertise humaine dans le domaine en question.

II.4.4 Méthodes basées sur les données

Certains chercheurs décomposent les méthodes de diagnostic de défauts en deux grandes catégories, comme proposé par [26] :

1. Schémas basés sur le modèle ;
2. Schémas basés sur les données (sans modèle a priori).



FigureII.7 : classification des méthodes de diagnostic de défauts basées sur le modèle [26]

La disponibilité d'une grande quantité des données ainsi que les inconvénients des méthodes basées sur le modèle (comme la nécessité d'avoir un modèle précis), ont encouragé la croissance des méthodes de diagnostic basées sur les données. Ces méthodes font appel à des procédures d'apprentissage et de reconnaissance de forme, à la logique floue ou à l'intelligence artificielle afin de générer les symptômes de défaut qui seront analysés pour fournir la décision de diagnostic de défaut.

Les méthodes basées sur les données sont appropriées pratiquement pour n'importe quel type de problème pour lequel d'importantes quantités de données mesurées représentatives du fonctionnement du système sont disponibles.

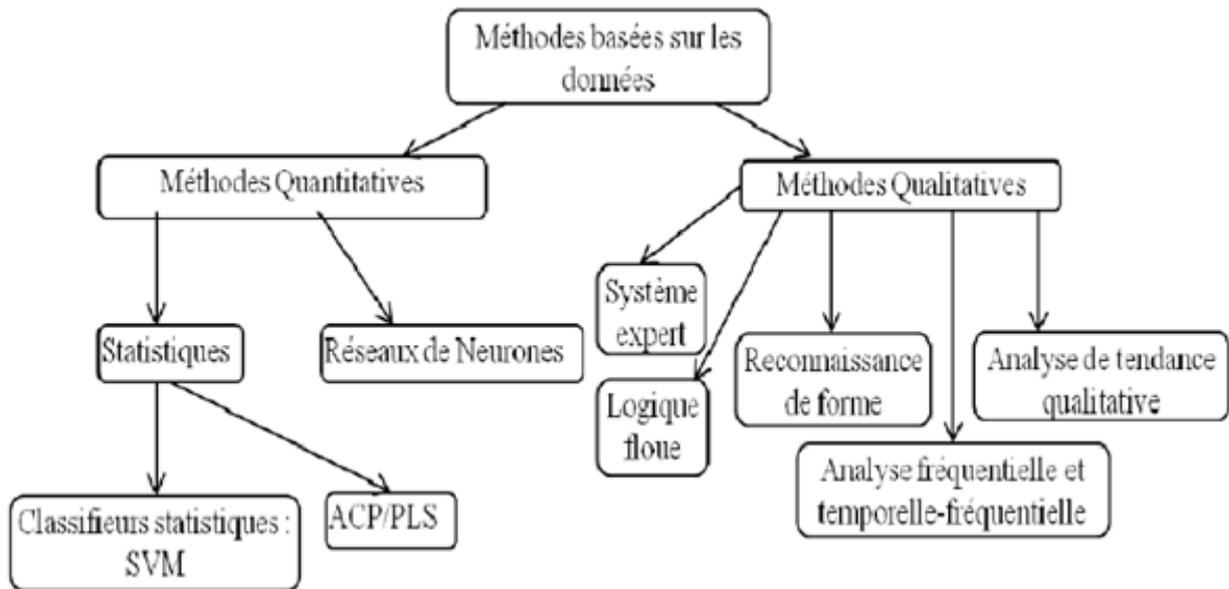


Figure II.8 : Méthodes de diagnostic à base de données [26]

L'application des méthodes basées sur les données pour le diagnostic de défaut est réalisée en plusieurs étapes : l'acquisition et prétraitement des données, l'extraction des caractéristiques importantes, et la validation du modèle. Selon l'objectif visé (modélisation ou diagnostic), ces étapes sont à adapter.

II.4.4.1 Etapes de mise en œuvre des méthodes basées sur les données

Dans l'objectif de diagnostic, les méthodes statistiques permettent de relier les entrées et sorties du système au type de situation (défectueuse ou normale pour différents défauts). L'application des méthodes basées sur les données pour le diagnostic de défaut est réalisée en plusieurs étapes :

- **Acquisition des données**

Cette étape concerne l'accueil (collection) et la préparation (prétraitement) des données. Ces données peuvent être échantillonnées dans le domaine temporel ou fréquentiel avec un intervalle d'échantillonnage adapté à la dynamique du procédé.

- **Prétraitement des données**

Le prétraitement des données est nécessaire pour réduction du bruit, la suppression des valeurs aberrantes, le traitement des valeurs manquantes et la normalisation des données.

- **Sélection et extraction des variables pertinentes**

L'utilisation de toutes les caractéristiques peut rendre le modèle de classification moins précis et non robuste au bruit et donc diminuer ses performances.

▪ **Modélisation**

On attend des méthodes basées sur les données utilisées pour le diagnostic de défaut de relier les entrées + sorties au type de situation (défectueuse ou normale pour différents défauts). Un modèle comportemental (ou empirique) est attendu, contrairement aux méthodes basées sur les modèles qui utilisent le modèle fondamental du système.

▪ **Validation du modèle**

Le critère de choix du modèle dépend de sa capacité d'ajustement sur les données d'apprentissage (estimation) et de test (validation). Un modèle avec un grand aspect de généralisation est capable de représenter le mieux la réalité. Et si deux modèles ont presque les mêmes performances d'ajustement, on choisit celui dont la structure est la plus simple.

Les indices de performances suivant sont utilisés pour le choix du meilleur modèle :

Erreur quadratique moyenne (MSE) « Mean Squared Error » :

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i - \hat{z}_i)^2 \tag{II.1}$$

Erreur absolue moyenne (MAE) « Mean Absolute Error » :

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |z_i - \hat{z}_i| \tag{II.2}$$

Erreur quadratique moyenne normalisée (NMSE) « Normalized Mean Squared Error » :

$$NMSE = \frac{1}{\sigma^2} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i - \hat{z}_i)^2 \tag{II.3}$$

Il faut que $NMSE < 1$

Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) « Root Mean Squared Error » :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i - \hat{z}_i)^2} \tag{II.4}$$

La somme relative des erreurs quadratiques (RSSE) « Relative Sum of Squared Error » :

$$RSSE = \frac{\sum_{i=1}^N (z_i - \hat{z}_i)^2}{\sum_{i=1}^N z_i^2} \tag{II.5}$$

Le coefficient de détermination R^2

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (z_i - \hat{z}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (z_i - \bar{z})^2} \tag{II.6}$$

z_i et \hat{z}_i sont respectivement la sortie et son estimée de l'échantillon i

II-5 Conclusion

Dans la deuxième chapitre, on a abordé les différents Types de défauts et spécialement les principaux défauts que sont en général (Défauts actionneurs; Défauts procédés ; Défauts capteurs). On a vu aussi les méthodes et les techniques de diagnostic les plus fréquemment utilisées dans le domaine des machines électriques. L'accent a été mis plus particulièrement sur la méthode de diagnostic basée sur modèle analytique. Puis, Méthodes de diagnostic sans modèle analytique, et comme l'intelligence artificielle est de plus en plus utilisée dans le domaine de la supervision et du diagnostic nous avons évoqué la Méthode par intelligence artificielle (IA). et on a terminé le deuxième chapitre par les Méthodes basées sur les données.

CHAPITRE III

Modélisation et simulation d'une machine asynchrone À cage d'écureuil

III-1 Introduction :

Avant de simuler par un simulateur quelconque il faut une modélisation de notre machine asynchrone à cage elle est essentiel surtout lorsque nous voulons étudier ses régimes permanent(à vitesse constante) et dynamique (démarrage ,freinage) par exemple à vide ou à charge , alimentée seule ou avec l'association d'un onduleur lors de commande .c'est –à- dire étudier ses caractéristiques électriques, magnétiques et mécaniques(tensions, courants, flux, couple....). [27]

Donc pour l'étudier parfaitement il faut que nous disposons d'un modèle mathématique , représentant bien et clairement notre machine qui est très compliquées ne pas simple mathématiquement et ça est du à sa nature non linéaire couplage naturelle de flux statorique et de flux rotorique lui-même crée par le flux statorique, et aussi l'inaccessibilité au rotor de ces points précisément parvient la difficultés de la commander, donc les chercheurs ont pensées à plusieurs stratégies parmi elle la commande à flux orienté(FOC)pour que le moteur asynchrone devient découplé Simple et la machine plus performante , Dans ce chapitre, on va s'intéresser à la modélisation de la machine asynchrone triphasée.

La machine asynchrone n'est pas un système simple, car de nombreux phénomènes compliqués interviennent dans son fonctionnement, comme la saturation, les courants de Foucault, l'effet pelliculaire ...etc. Cependant, nous n'allons pas tenir compte de ces phénomènes, car d'une part, leur formulation mathématique est difficile, d'autre part, leurs incidences sur le comportement de la machine est considérée comme négligeable dans certaines conditions. Ceci nous permet d'obtenir des équations simples, qui traduisent fidèlement le fonctionnement de la machine.

D'abord on commence par poser les systèmes d'équations en grandeurs de phases. Puis, en appliquant la transformation de Park, un système réduit est obtenu qui nous servira ultérieurement lors de l'association convertisseur-moteur. Pour la simulation nous avons utilisées le logiciel MATLAB /SIMULINK Qui est un logiciel très utilisées [28].

III.2- Description de la machine asynchrone triphasée (MAS) :

III.2.1- Construction :

Un moteur asynchrone se compose de deux parties , une partie fixe constituée d'une carcasse(carter) entourant le circuit magnétique et l'enroulement statorique polyphasé bobiné en fil de cuivre isolé (notre cas triphasé),logé dans des encoches du stator d'une part, ressemble bien à un cylindre creux à l'intérieur du quelle une partie mobile séparé par un vide (entrefer) le circuit magnétique rotorique sous la forme d'une masse en aluminium, qui accueille dans ces encoches les barreaux de la cage rotorique, court -circuits à chaque extrémités par des anneaux en aluminium associée à l'arbre qui repose sur des paliers montés dans de flasques fixés au carter. Le trois enroulements statoriques et le trois enroulements rotoriques décalé l'un à l'autre de $(2\pi/3)$, à P paires de pôles chacun.

Le rotor porte un enroulement polyphasé mis en court-circuit. On peut distinguer deux types de rotor :

- Les rotors à bagues (rotor bobiné) dont un enroulement généralement triphasé, couplé en étoile ou en triangle, logé dans des encoches semi-fermées, est connecté à trois bagues isolées sur lesquelles frottent des balais en charbon.

- Les rotors à cages munis d'un enroulement constitué par des barres conductrices court-circuitées

À leurs extrémités par des anneaux (rotor à cage d'écureuil).

D'un point de vue électrique, les deux formes sont équivalentes, or le rotor à cage est plus robuste.

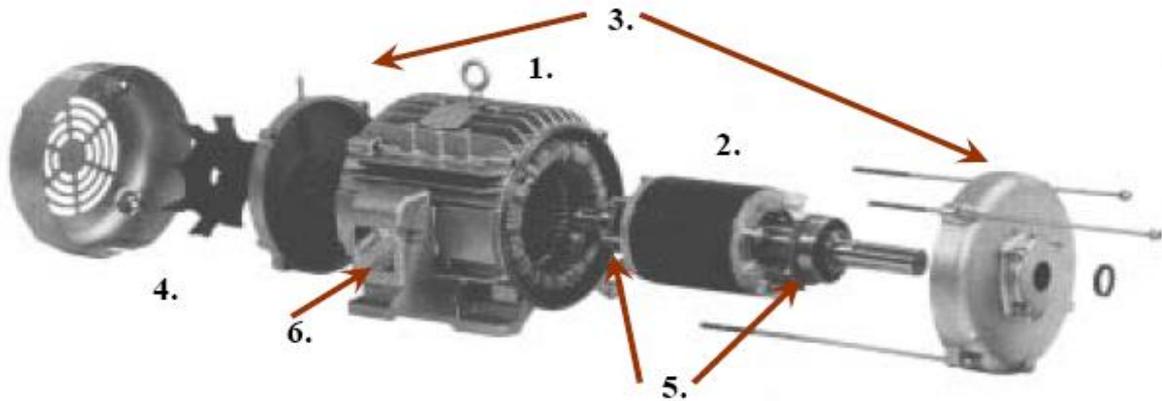


FIGURE III.1 : construction d'un moteur asynchrone à cage (1) le stator, (2) le rotor, (3) flasques, (4) ventilateur de refroidissement, (5) roulements à billes (6) boîte à bornes, plus les tiges de montage et le capot de ventilation [29].

III 2.2- Principe de fonctionnement :

Les trois courants statoriques i_{sa} , i_{sb} et i_{sc} de pulsation ω_s engendrent une force magnétomotrice unique E_s tournante à la vitesse $\Omega_s = \omega_s/p$

- le rotor tournant à la vitesse Ω voit le champ tourner à la vitesse $\omega_s/p - \Omega$

Ce champ induit au rotor des courants de pulsation $\omega_r = \omega_s - p\Omega = \omega_s - \omega$

Le rotor étant à l'arrêt. La force magnétomotrice E_s induite dans les phases rotoriques des forces électromotrices. Donc les courants de pulsation temporelle ω_r puisqu'un observateur lié au rotor voit défiler P paires de pôles pendant une période de rotation du champ tournant statorique.

D'après la loi de **Lenz**, les courants induits rotoriques s'opposent à la cause qui leurs a donné naissance, le déplacement de E_s par rapport au rotor, par conséquent. L'effet de réaction de cette loi se traduit par le lancement du rotor à la poursuite de E_r c'est à dire par la création d'un couple électromagnétique.

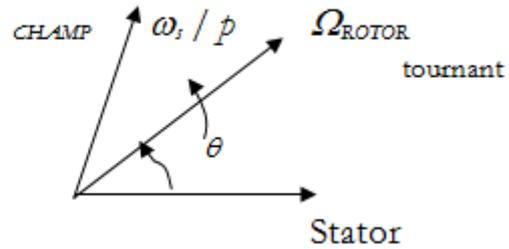
la vitesse relative du rotor ω_r par rapport à la vitesse du champ tournant ω_s , s'appelle le glissement g :

$$g = \omega_r / \omega_s = (\omega_s - \omega) / \omega_s$$

$$\text{Donc: } \omega_r = g \omega_s$$

$$\Omega = (1-g) \omega_s / p = (1-g) \Omega_s$$

- $g=1$: arrêt;
- $g=0$: synchronisme.



Le rotor ne peut pas rattraper le champ tournant statorique, car si s'était le cas, il serait soumis à un champ fixe dans son espace, avec pour conséquence la nullité des courants induits et du couple électromagnétique, ainsi la vitesse du rotor Ω est nécessairement inférieure à la vitesse de synchronisme (Ω_s). Alors, c'est le fonctionnement en asynchrone. [30]

III.3- Modèle de la machine asynchrone triphasée (MAS) :

III.3.1- Hypothèses simplificatrices :

La machine asynchrone, avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe. Pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, et comme nous l'avons déjà soulevé, il est alors nécessaire d'adopter certaines hypothèses simplificatrices :

- La machine est de constitution symétrique.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont tous négligés. Les relations entre les flux et les courants sont linéaires.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
- On considère une densité de courant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, l'effet de peau est négligé.
- On admet de plus que la force magnétomotrice créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligé. Les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes rotoriques et statoriques.

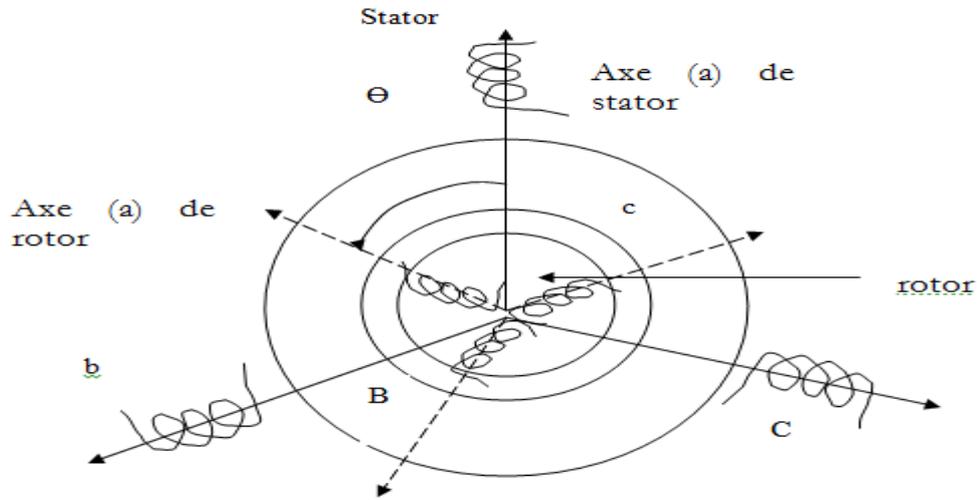


FIGURE III.2 : Modélisation de la machine asynchrone dans un repère triphasé.

III.3.2- Equations électriques de la MAS :

Avec les hypothèses citées ci-dessus, les équations des tensions des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit [31], [32] :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \\ [0] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r] \end{cases} \quad (III.1)$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} ; \quad [I_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} ; \quad [I_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}$$

III .3.3-Equations magnétiques de la MAS :

Les équations des flux en fonction des courants s'obtiennent à partir des différentes inductances, dont certaines dépendent de temps par l'intermédiaire de l'angle électrique Θ , position de la phase (a) du rotor par rapport à la phase (a) de stator (figure III.1) :

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\Phi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s] \end{cases} \quad (III.2)$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} ; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

La matrice des inductances mutuelles (matrice de couplage rotor-stator) s'écrit :

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad [M_{rs}] = [M_{sr}]^t \quad (\text{III.3})$$

En remplaçant (III.2) dans (III.1), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} \{ [L_{ss}][I_s] \} + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}][I_r] \} \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} \{ [L_{rr}][I_r] \} + \frac{d}{dt} \{ [M_{rs}][I_s] \} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

On peut simplifier grandement les équations (III.1) et (III.2) par l'introduction de vecteur spatial : Une grandeur triphasée peut être exprimé dans différents référentiels liés à la machine asynchrone ces référentiels sont de type biphasé (voir la figure III.2) ce qui réduit considérablement la complexité du modèle, et comme nous avons dans les hypothèses simplificatrices que la structure de la machine est symétrique et équilibrée permet le passage d'une représentation triphasée à une représentation biphasée (transformation de Park et concordai).

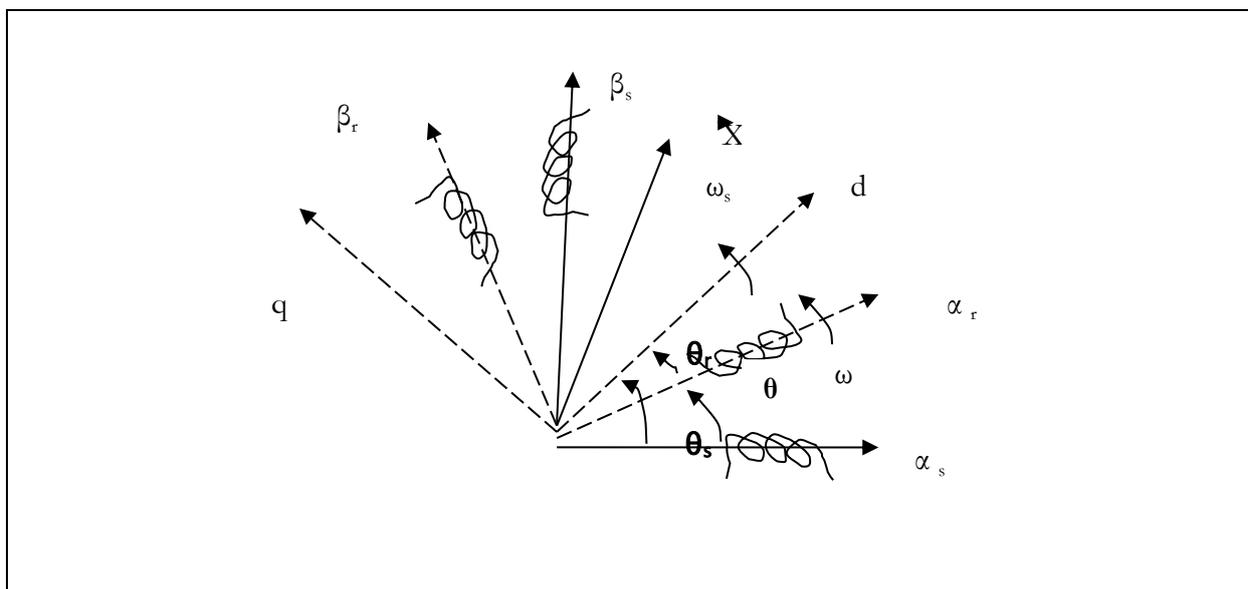


FIGURE III.3 transformation de repères

Les équations des tensions et de flux du stator et du rotor du modèle vectoriel de la machine dans un référentiel (d, q) tournant à une vitesse ω_s par rapport au stator sont :

$$\begin{aligned}
 V_s &= R_s I_s + d/dt \phi_s + j \omega_s \phi_s . \\
 V_r &= 0 = R_r I_r + d/dt \phi_r + j(\omega_s - \omega) \phi_r \\
 \Phi_s &= L_s I_s + M I_r \\
 \Phi_r &= L_r I_r + M I_s
 \end{aligned}
 \tag{III.5}$$

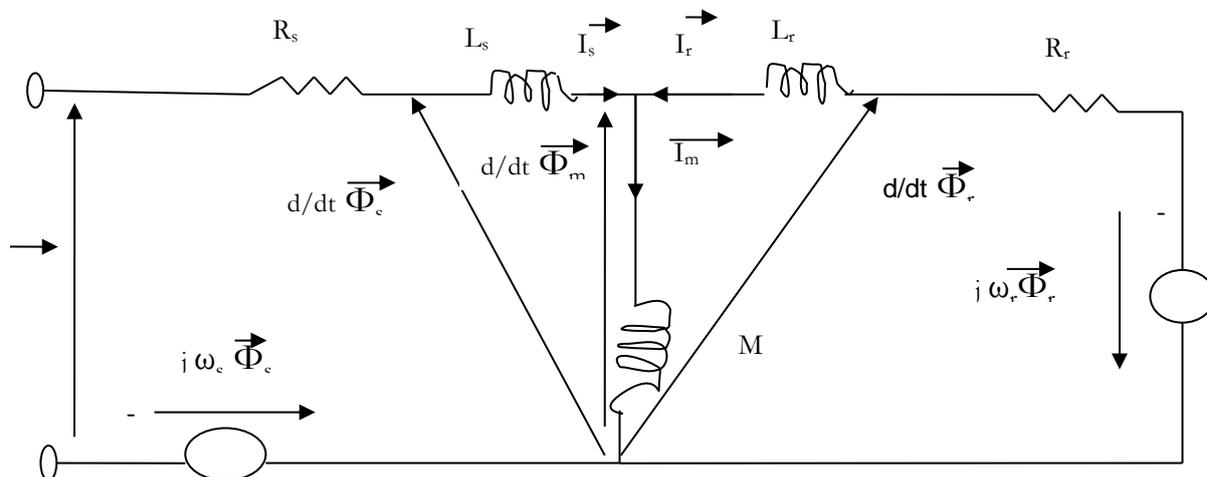


FIGURE III.4 : schéma équivalent dynamique dans un référentiel tournant

Les projections des équations du modèle vectoriel dans le référentiel tournant, sur les deux axes (d, q), permettent d'obtenir les équations de Park de la machine asynchrone : avec l'introduction des nombres complexes nous aurons :

$$\begin{aligned} V_s &= V_{ds} + jV_{qs} \\ V_r &= V_{dr} + jV_{qr} \\ \Phi_s &= \Phi_{ds} + j\Phi_{qs} \\ \Phi_r &= \Phi_{dr} + j\Phi_{qr} \end{aligned} \quad (III.6)$$

Et nous réarrangeons nous trouvons:

(III.2) s'écrivent :

Remplaçant la vitesse de référentiel ω_s par ω_p :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_p \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_p \phi_{ds} \end{cases} \quad (III.7)$$

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_p - \omega)\phi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_p - \omega)\phi_{dr} \end{cases} \quad (III.8)$$

Avec :

Avec :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} ; \begin{cases} \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (III.9)$$

Et :

$L_s = l_s - M_s$: Inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r - M_r$: Inductance cyclique rotorique.

$M_{sr} = M_{rs} = M$: Inductance mutuelle cyclique entre rotor et stator.

III.3.4-Equation mécanique de la MAS :

Le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante :

$$C_{em} = p [I_s]^t \frac{d}{d\theta} [M_{sr}] [I_r] \quad (III.10)$$

L'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f \Omega \quad (III.11)$$

La résolution analytique dans ce repère est très difficile car le système d'équations est à coefficients variables en fonction de θ (angle de rotation électrique de la machine). L'application d'une transformation dite de Park nous permet la résolution d'un tel système.

III.4- Transformation de Park :

La transformation de Park consiste à transformer un système triphasé (a, b, c) en un système diphasé équivalent (d, q) (Figure. III.5).

Les matrices de passage directe $[P(\theta)]$ et inverse $[P(\theta)]^{-1}$ sont ainsi définies comme suit [31];[32] :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (III.12)$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (III.13)$$

Et on a : $[X_d, X_q, X_o]^t = [P(\theta)][X_a, X_b, X_c]^t$. X : Peut-être la tension, le courant ou le flux.

• Conventions :

La machine est représentée par trois phases statoriques A_s, B_s et C_s et trois phases rotoriques a_r, b_r, c_r (Figure. III.5).

$$\text{On a } \omega = p\Omega = \frac{d\theta}{dt}; \quad \theta_r = \theta_p - \theta$$

$\omega_p = \frac{d\theta_p}{dt}$: vitesse angulaire des axes (d, q) par rapport au stator.

$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$: Vitesse angulaire des axes (d, q) par rapport au rotor.

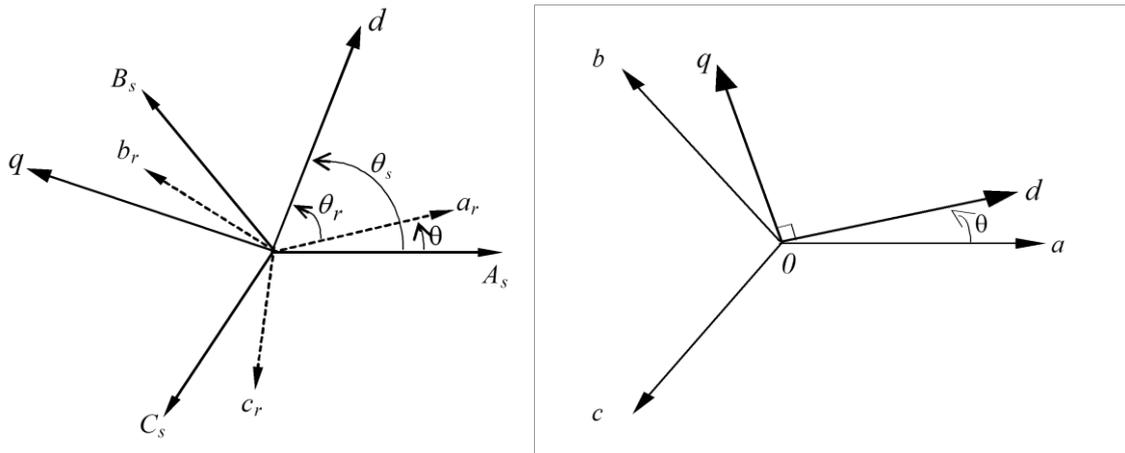


FIGURE III.5 : systèmes d'axes triphasés

III.5- Modélisation de la MAS dans le repère de Park :

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions et flux un changement de variables en faisant intervenir l'angle entre les axes des enroulements et les nouveaux axes d et q . Ceci peut être interprété comme la substitution, aux enroulements réels (a_s, b_s, c_s) et (a_r, b_r, c_r) , des enroulements fictifs (d_s, q_s) et (d_r, q_r) , dont les axes magnétiques sont liés aux axes d et q (Figure. III.6)

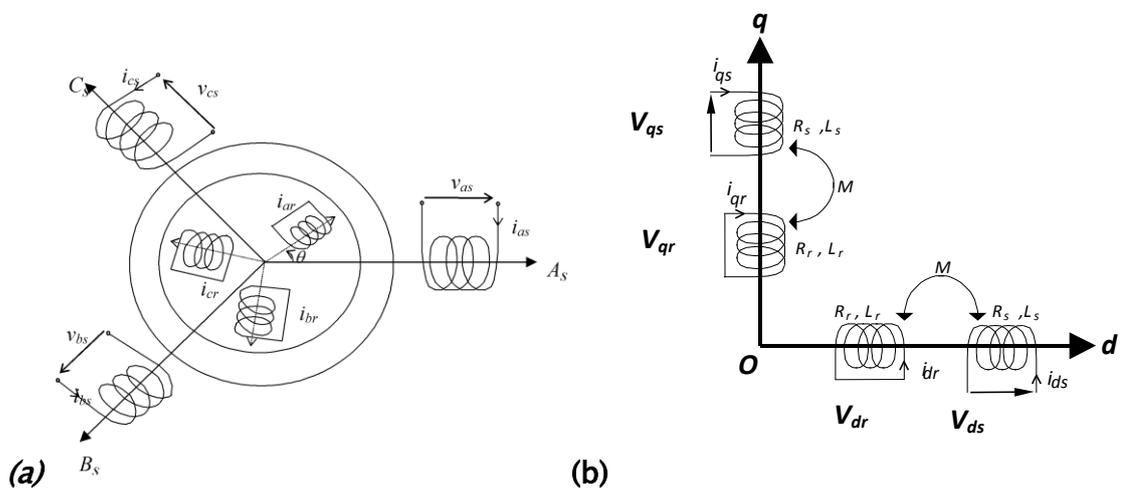


FIGURE III.6:(a)la représentation de MAS dans l'espace électrique et dans le repère de Park (b)

Dans le repère de Park (d, q) tournant à la vitesse angulaire $\omega_p = \frac{d\theta_p}{dt}$, les équations (III.1) et (III.2) s'écrivent :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_p \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_p \phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_p - \omega)\phi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_p - \omega)\phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Avec :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} ; \begin{cases} \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Et :

$L_s = l_s - M_s$: Inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r - M_r$: Inductance cyclique rotorique.

$M_{sr} = M_{rs} = M$: Inductance mutuelle cyclique entre rotor et stator.

III.5.1- Choix du référentiel :

Le référentiel est le système d'axes (d, q) associé à la vitesse de rotation choisie pour lui, c'est à dire ω_p . Il y a trois types de référentiel intéressants. En pratique, le choix se fait en fonction du problème étudié.

a- Référentiel lié au stator :

C'est le référentiel le mieux adopté pour travailler avec les grandeurs instantanées. Il se traduit par la condition :

$$\frac{d\theta_p}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega \quad (\text{III.13})$$

b- Référentiel lié au rotor :

C'est le choix quand on a besoin d'étudier des grandeurs rotoriques. Il se traduit par la condition :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_p}{dt} = \omega \quad (\text{III.14})$$

c- Référentiel lié au champ tournant :

C'est pour l'étude de la commande. Dans ce cas :

$$\omega_p = \omega_s \quad (\omega_s: \text{Vitesse de synchronisme})$$

$$\frac{d\theta_p}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} \Rightarrow \omega_p = \omega_s \quad (\text{III.15})$$

Dans notre travail, on va prendre un référentiel lié au stator. Le modèle de la machine asynchrone triphasée s'écrit alors dans ce repère de Park comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} \end{array} \right. , \left\{ \begin{array}{l} 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} + \omega \phi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - \omega \phi_{dr} \end{array} \right. \quad (\text{III.16})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) \\ J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - K_f \Omega \end{array} \right. \quad (\text{III.17})$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{array} \right. , \left\{ \begin{array}{l} \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{array} \right. , \left\{ \begin{array}{l} \phi_{dm} = M (i_{ds} + i_{dr}) \\ \phi_{qm} = M (i_{qs} + i_{qr}) \end{array} \right. \quad (\text{I.18})$$

III.6- les équations utilisées dans le modèle simulent:

Nous allons utiliser l'opérateur de Laplace intégral 1/s à la place de l'opérateur de Laplace dérivation s parce que simulations marche mieux avec cette opérateur

a- Référentiel lié au stator :

Si nous revenons au système d'équations (III.16) les flux de stator et rotor s'exprime comme suit (nous avons choisi ce référentiel pour simuler notre machine)

$$\begin{aligned}
 \Phi_{ds} &= 1/s \times (v_{ds} - R_s i_{ds}), \\
 \Phi_{qs} &= 1/s \times (v_{qs} - R_s i_{qs}), \\
 \Phi_{dr} &= 1/s \times (-R_r i_{dr} - \omega \Phi_{qr}) \\
 \Phi_{qr} &= 1/s \times (-R_r i_{qr} + \omega \Phi_{dr})
 \end{aligned} \tag{III.19}$$

Et de la même façon nous exprimons à partir de système (III.18) les courants statoriques et rotoriques comme suit:

$$i_{ds} = \Phi_{ds}/L_s - M i_{dr}/L_s$$

Nous essayons d'exprimer i_{ds} seul :

Donc on remplace i_{dr} dans l'expression précédente par la relation suivante :

$$i_{dr} = \Phi_{dr}/L_r - M i_{ds}/L_r$$

Nous avons:

$$i_{ds} = \Phi_{ds}/L_s - M(\Phi_{dr}/L_r - M i_{ds}/L_r)$$

$$i_{ds} = \Phi_{ds} \times L_r / L_x - \Phi_{dr} \times M / L_x \tag{III.20}$$

$$\text{Avec } L_x = L_s \times L_r - M^2$$

Donc de la même façon nous pouvons exprimer les autres courants :

$$i_{qs} = \Phi_{qs} \times L_r / L_x - \Phi_{qr} \times M / L_x$$

$$i_{dr} = \Phi_{dr} \times L_s / L_x - \Phi_{ds} \times M / L_x \tag{III.21}$$

$$i_{qr} = \Phi_{qr} \times L_s / L_x - \Phi_{qs} \times M / L_x$$

Le couple électromagnétique :

$$\begin{cases} C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) \\ J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - K_f \Omega \end{cases} \tag{III.22}$$

La vitesse de rotation:

$$\Omega = (C_{em} - C_r) / (K_r + SJ) \quad (III.23)$$

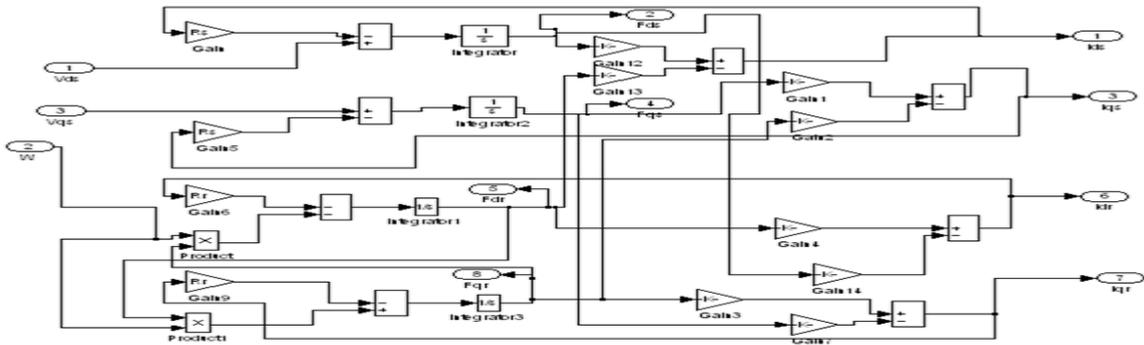


Figure III.7 Schéma fonctionnel des courants Iqs ,Ids ,Iqr, Idr, et les flux Fqs, Fds, Fqr, Fdr dans la base de Park (référentielle statorique) :

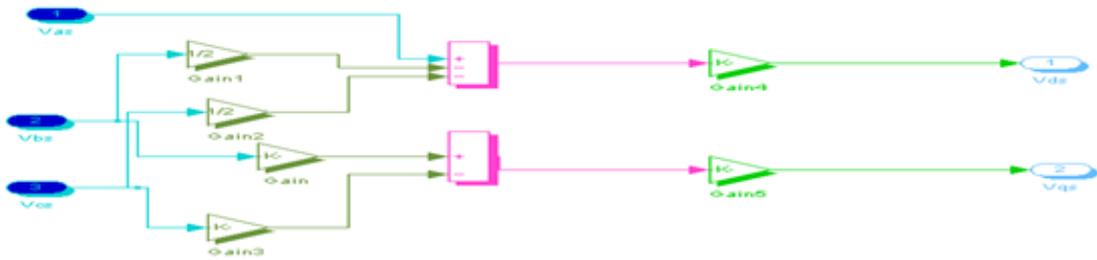


Figure III.8- schéma fonctionnel de la transformation de Park directe

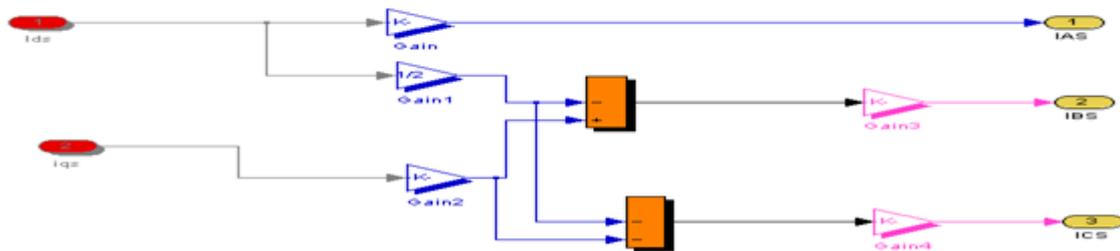


figure III.9-: schéma fonctionnel de la transformation de Park inverse

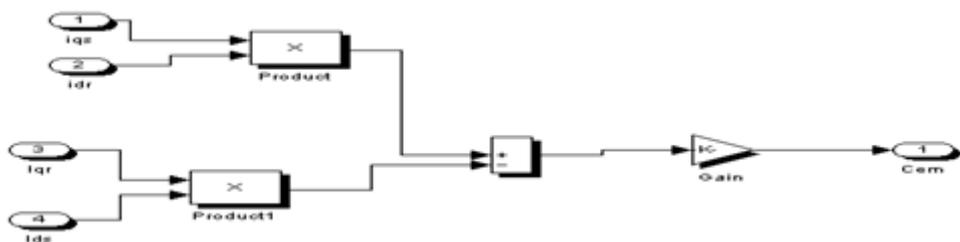


Figure III.10-: schéma fonctionnel simplifier couple électromagnétique

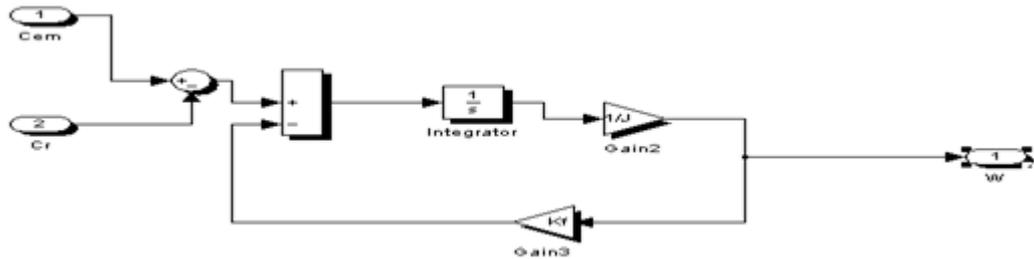


Figure III.11- Schéma fonctionnel de la vitesse

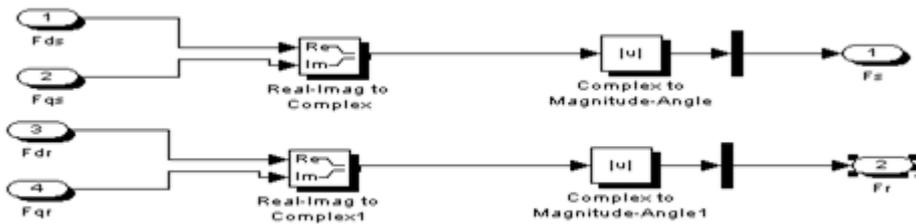


Figure III.12 Schéma fonctionnel flux statorique et rotorique

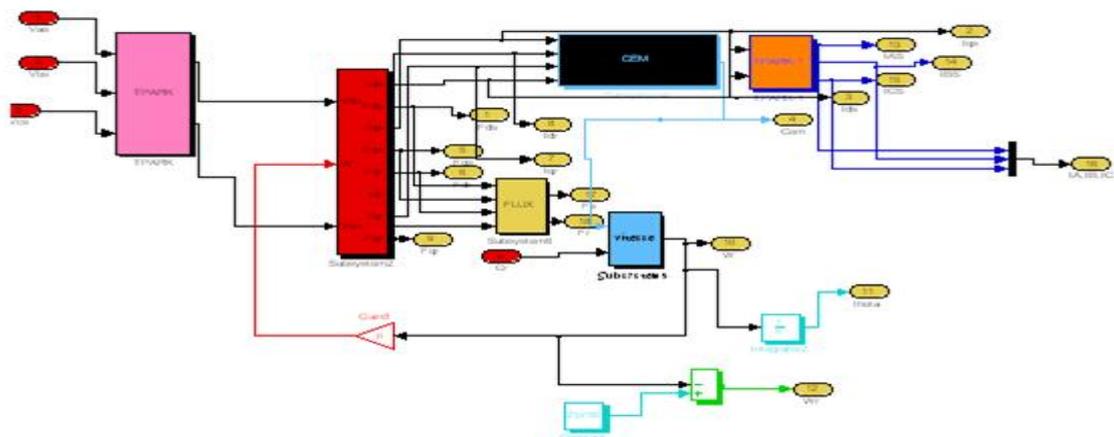


figure III.13- Schéma fonctionnel simplifié de la machine asynchrone dans la base de Park



Figure III 14- Schéma fonctionnel de l'alimentation triphasée 220V ,50Hz

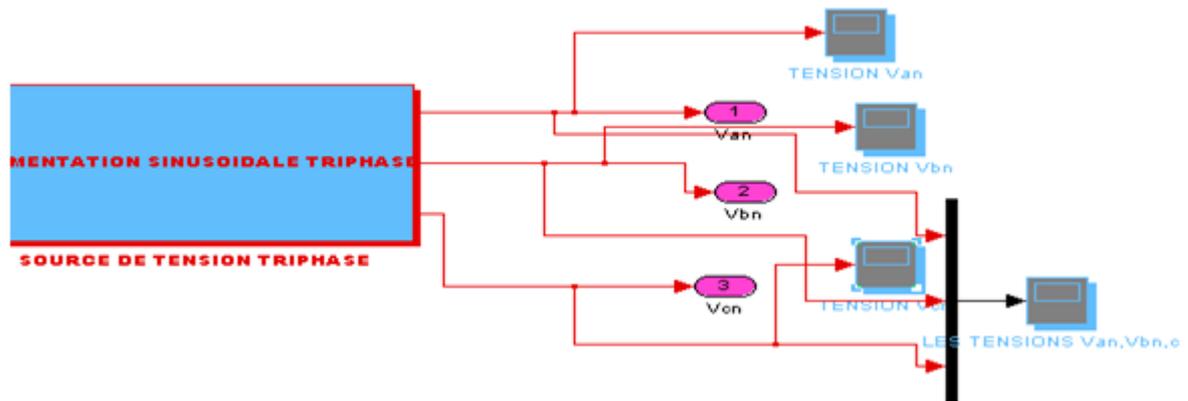


Figure III.15-schéma fonctionnel de l'alimentation triphasée 220V, 50Hz

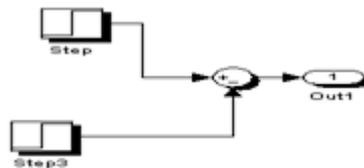


figure.III.16-:schéma fonctionnel de la charge

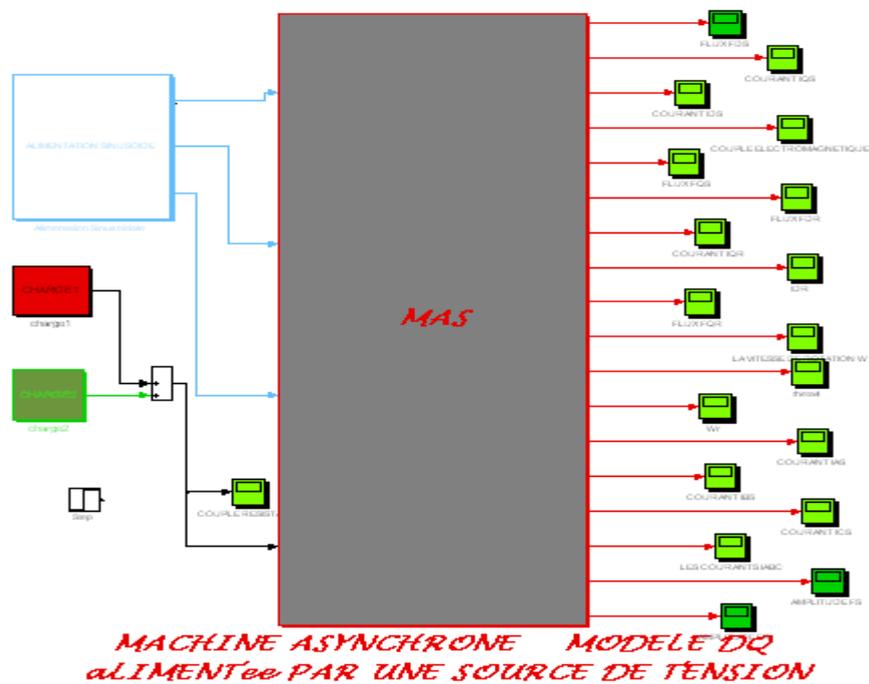


Figure III.17 Schéma bloc de la machine asynchrone à vide alimentée en vue de simulation.

III.7- Résultats de la Simulation de la machine asynchrone sous Matlab-Simulink :

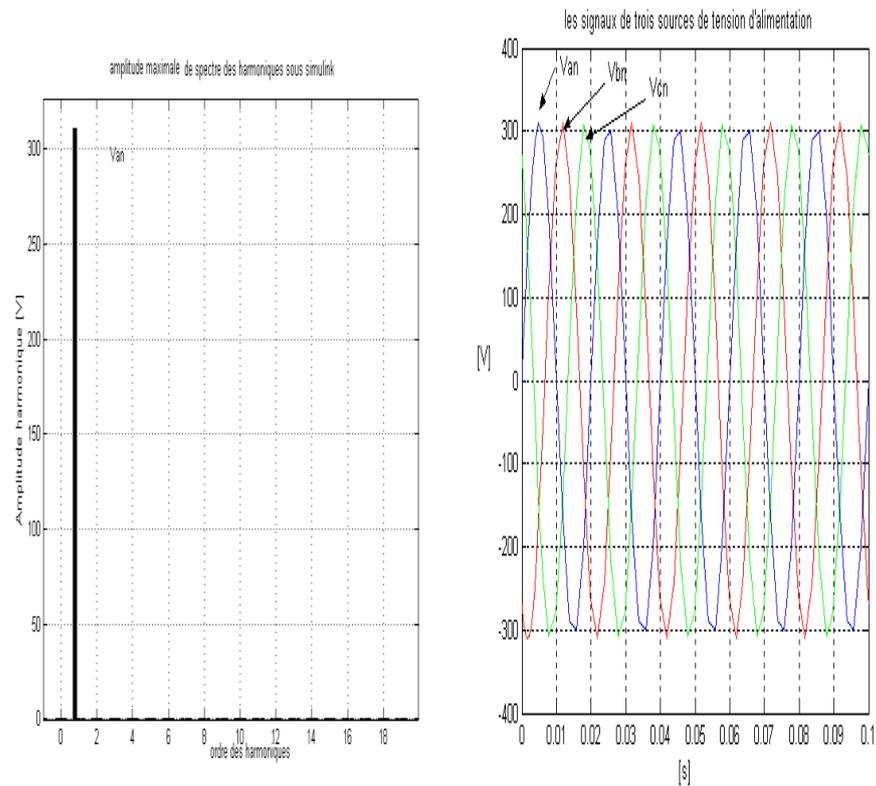


Figure III.18- à gauche le spectre d'harmonique fondamental de la phase d'alimentation V_{an} et à droite l'alimentation de tension triphasée équilibrée

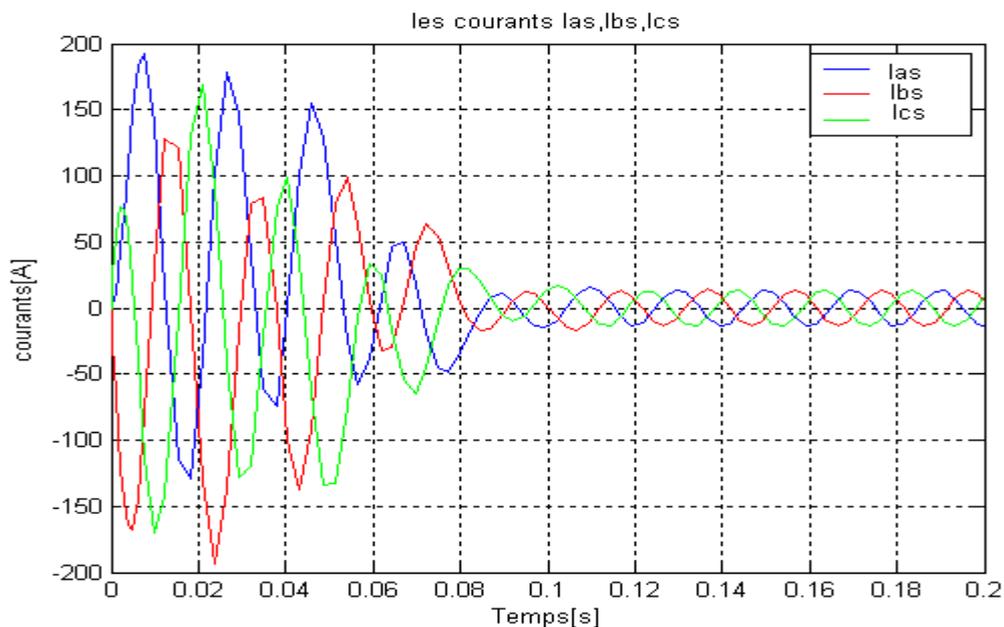


Figure III.19: les courants statoriques

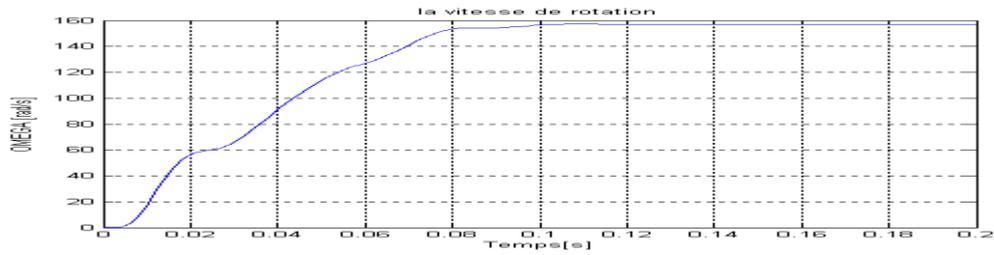


Figure III.20: la vitesse de rotation

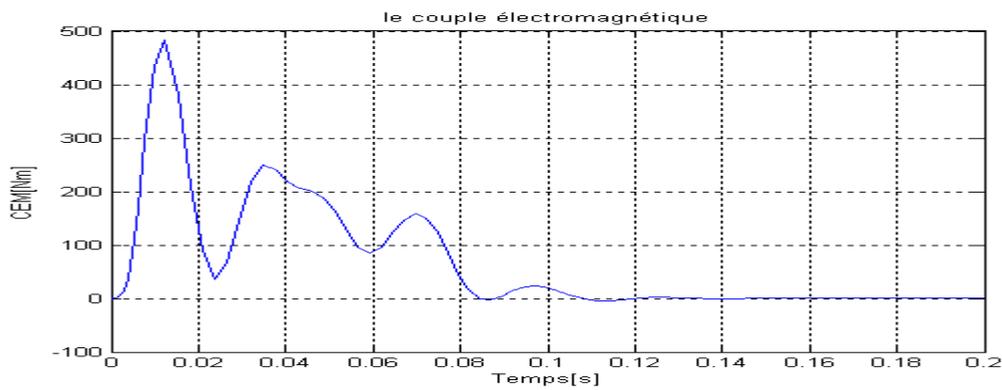
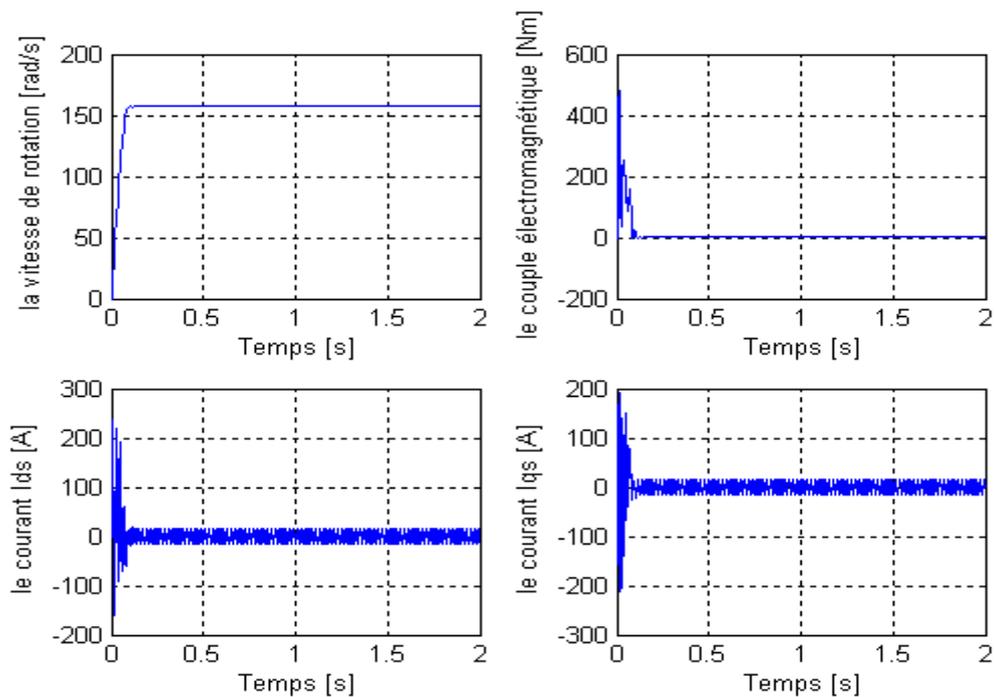


Figure III.21: le couple électromagnétique



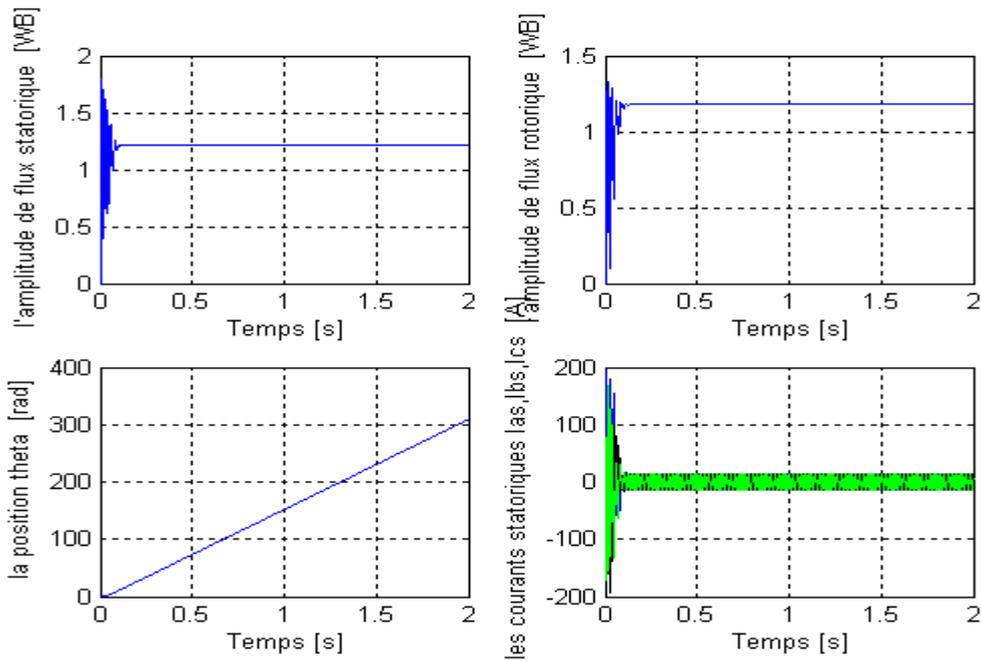


Figure III.22- Simulation de la machine asynchrone à vide en fonction de temps

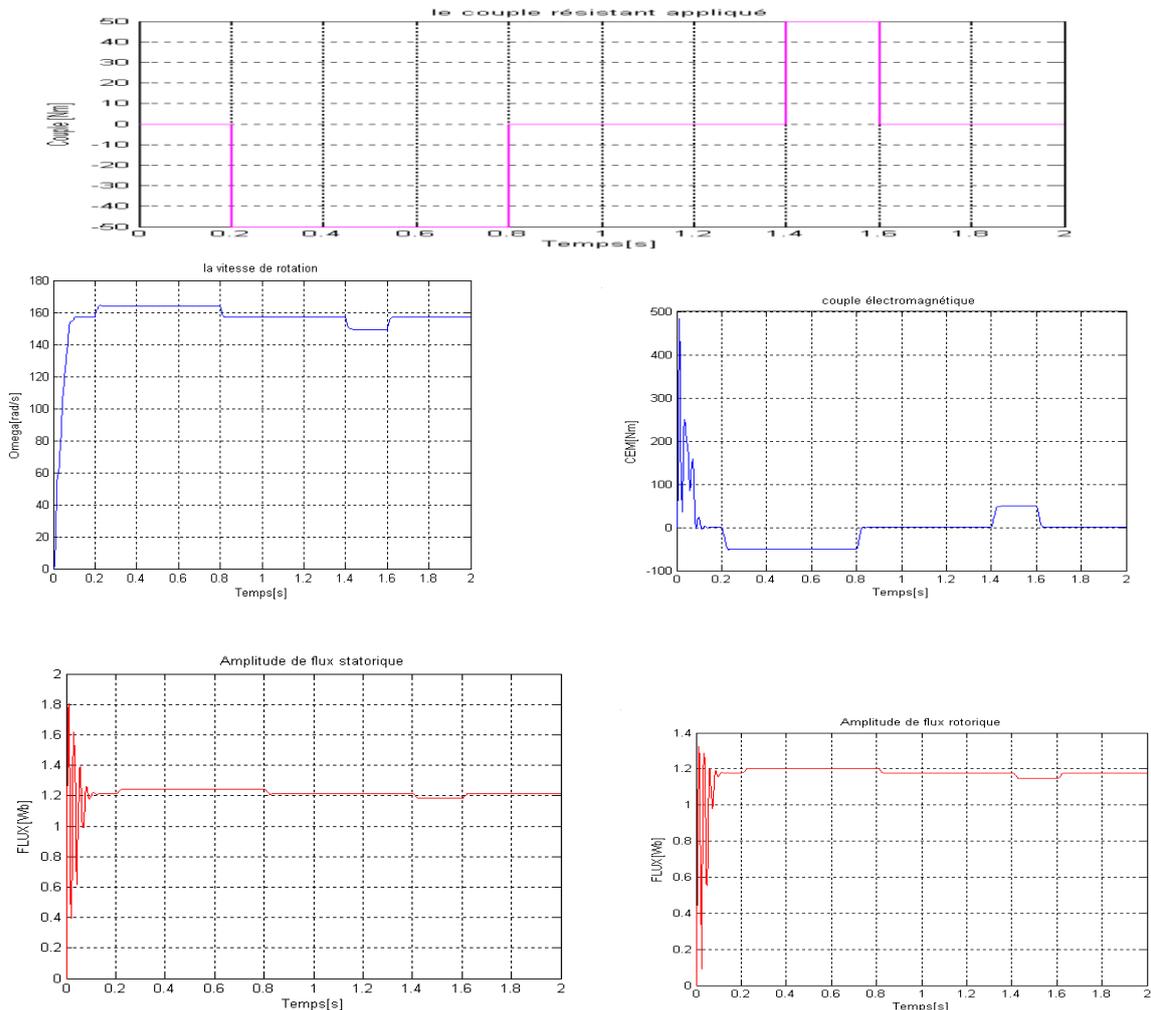


Figure III.23- Simulation de la machine asynchrone à charge en fonction de temps

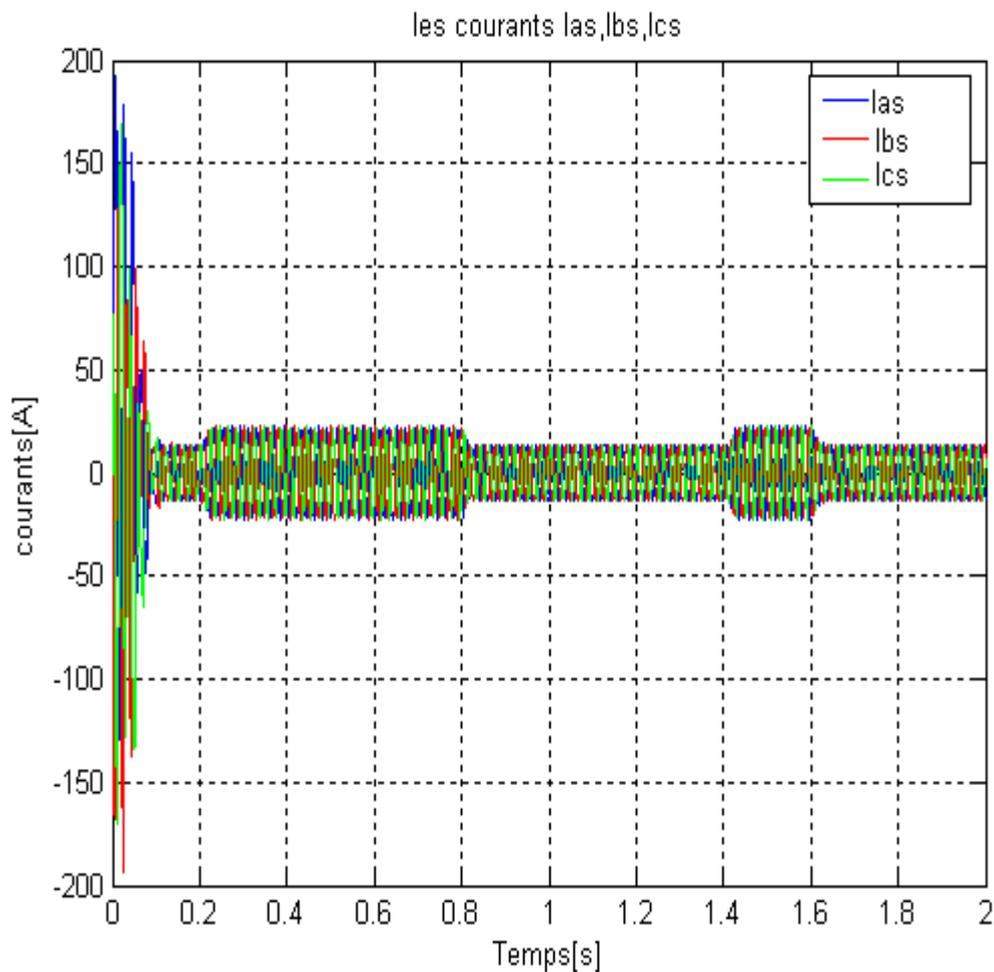


Figure III.24-mulation de la machine à charge avec l'application d'un couple résistant $C_r = -50[\text{Nm}]$ de 0.2[s] à 0.8 [s] et $C_r = 50[\text{Nm}]$ de 1.4[s] à 1.6[s].

III.7.1- Interprétation des résultats :

Dans ce premier chapitre, on a simulé la machine asynchrone dans la base de Park (d,q) dans le référentiel statorique, alimentée par un réseau triphasé équilibré 220/380 V, $f=50$ Hz, Figure(III.17) à vide et à charge sous le logiciel simulink/matlab.

Voir les paramètres de la machine asynchrone (annexe1).

Dans la Figure(III.18)- à gauche le spectre d'harmonique fondamental de la phase d'alimentation V_{an} et à droite l'alimentation de tension triphasée équilibrée 220/380 V, $f=50$ Hz.

De La Figure (III.19) les courants statoriques; Figure(III.20):la vitesse de rotation; Figure(III.21):le couple électromagnétique jusqu'à la Figure(III.19) donne le résultats de la simulation de la MAS à vide, c'est-à-dire le couple résistant est nul $C_r=0$, si on voit bien la courbe de couple électromagnétique au démarrage à vide, qu'il est fortement oscillatoire, il

atteint un pic de 480[Nm], et aussi un fort appel de courant bref, mais très important, engendrant un bruit dans la partie mécanique à cause de CEM très important au démarrage, et le bruit disparaîtra quand le CEM devient nul parce que nous avons annulé le couple résistant, le régime permanent est atteint dans un délai très court, la vitesse de rotation ω de rotor est quasi linéaire au démarrage et se stabilisera à 157 [rad/s], parce que le moteur possède 2 paires de pôles. La vérification des courbes, de CEM, Vitesse, Flux, Courants, le temps d'établissements de ces grandeurs est de l'ordre de 0.1[s], ou plus exactement le temps de régime transitoire durera 0.1[s] que ce soit à vide ou à charge.

Sur la Figure(III.23) et la Figure(III.24) donne les résultats de la simulation de la MAS à charge variable, $C_r = -50$ [Nm] de 0.2[s] à 0.8 [s] et $C_r = 50$ [Nm] de 1.4[s] à 1.6[s]. L'introduction de couple résistant négatif $C_r = -50$ [Nm], à provoquer une augmentation de la vitesse rotation 164 [rad/s] et aussi une augmentation de flux statorique et rotorique, dans l'intervalle de temps 0.2[s] à 0.8 [s], on aperçoit bien que le CEM tendra vers la valeur de $C_r = -50$ [Nm], au contraire l'application d'un couple positif $C_r = 50$ [Nm] de 1.4[s] à 1.6[s]. À diminuer la vitesse de rotation à la valeur 149 [rad/s]. Et aussi une réduction de flux statorique et rotorique, le CEM tendra vers la valeur de couple résistant $C_r = 50$ [Nm], le courant augmentera lorsque couple résistant est appliqué quel que soit positif ou négatif.

III.8 CONCLUSION :

Dans ce chapitre, on a utilisé des hypothèses simplificatrices et une transformation de Park pour passer d'un système triphasé (a, b, c) en un système biphasé équivalent (d, q) , cette transformation permet de réduire la complexité de notre machine asynchrone et par conséquent simplifier son étude. On a présenté le modèle de Park de la machine asynchrone, à savoir les équations électriques, magnétiques et l'équation mécanique.

Après cela nous avons simulé notre modèle de Park sous Simulink/Matlab, les résultats obtenus confirment la validité de notre modèle lié au référentiel statorique. Les graphiques examinés des grandeurs (tension, couple, vitesse, courant, ...) lors de l'alimentation de la machine par une source de tension équilibrée à vide ou à charge, nous a permis de connaître les caractéristiques des grandeurs électriques de la machine asynchrone pendant les régimes transitoire et permanent.

CHAPITRE IV

**Détection et diagnostics de défauts
d'un moteur asynchrone par les
méthodes de Park et Hilbert**

IV-1- Introduction:

Le moteur asynchrone est certainement la machine électrique la plus fréquemment utilisée dans l'industrie. Cela tient, surtout s'il s'agit du moteur à cage, à sa grande robustesse, à la facilité avec laquelle on peut le démarrer, et à son prix de revient [33]. Ces machines sont soumises pendant leur fonctionnement à plusieurs contraintes de différentes natures. L'accumulation de ces contraintes provoque des défauts dans les différentes parties du moteur. Ces défauts peuvent aller jusqu'à l'endommagement total du moteur qui paralyse le processus industriel, ce qui se répercute sur la production [34]. La protection des machines électriques ne peut pas éviter l'apparition de ces défauts et leurs conséquences sur les machines électriques, puisque l'appareillage de protection n'intervient qu'au dernier stade du défaut, c'est-à-dire dans le cas critique de l'évolution du défaut [35].

De même la maintenance classique des machines électriques ne peut pas détecter ces défauts dans la plupart des cas, vu que certains types de défauts échappent aux techniques classiques utilisées dans ce genre de maintenance, surtout dans le cas de la vérification des différentes parties de la machine lorsqu'elle est en arrêt (off line) [36].

La détection des défauts dans leur premier stade (maintenance préventive) est devenue une nécessité majeure afin d'éviter la défaillance totale des machines électriques. De nombreux travaux ont été consacrés à ce nouveau type de maintenance utilisant différentes techniques de diagnostic. La plupart de ces techniques utilisent les grandeurs mécaniques (couple, vitesse, vibrations, bruit, etc.) qui demandent l'introduction de capteurs au niveau de la machine, ce qui est difficile et coûteux dans la plupart des cas [37].

Parmi les méthodes de diagnostic récemment utilisées et surtout celles qui s'orientent vers les grandeurs électromagnétiques (flux, tension, courant, etc.) [36], la méthode du courant statorique. Cette technique présente plusieurs avantages par rapport aux autres, surtout s'il s'agit de son implémentation qui n'exige ni l'introduction de capteurs au niveau de la machine ni l'utilisation d'un équipement coûteux et encombrant, mais seulement un capteur de courant (transformateur de courant ou sonde à effet Hall), qui donne une image sur le courant de phase statorique [34].

La sortie du capteur de courant est reliée après amplification et filtrage à un synthétiseur de Park et un oscilloscope ou relié à un ordinateur [38, 39].

De plus cette technique est utilisée lors du fonctionnement du moteur (on line), ce qui nous permet de l'utiliser dans la surveillance des machines. Cette étude est consacrée à l'utilisation de cette technique basée sur le tracé des vecteurs de Park pour la détection des défauts de barres dans le moteur asynchrone à cage.

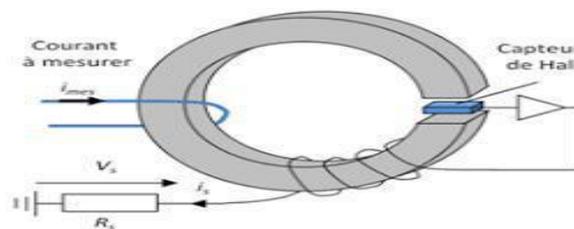


Figure.IV.1 Capteur a effet hall

IV-2- approche des vecteurs de Park

Cette méthode est basée sur la transformation de Park, à savoir la transformation des grandeurs de la machine triphasée à celles d'une machine biphasée, selon les deux axes detq.

On obtient de cette transformation les vecteurs de Park des tensions, des flux et des courants. Cette technique utilise les deux composantes du courant statorique i_{sd} et i_{sq} [6, 7]. Les vecteurs des courants de Park i_{sd} et i_{sq} en fonction des courants statoriques (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) s'expriment comme suit :

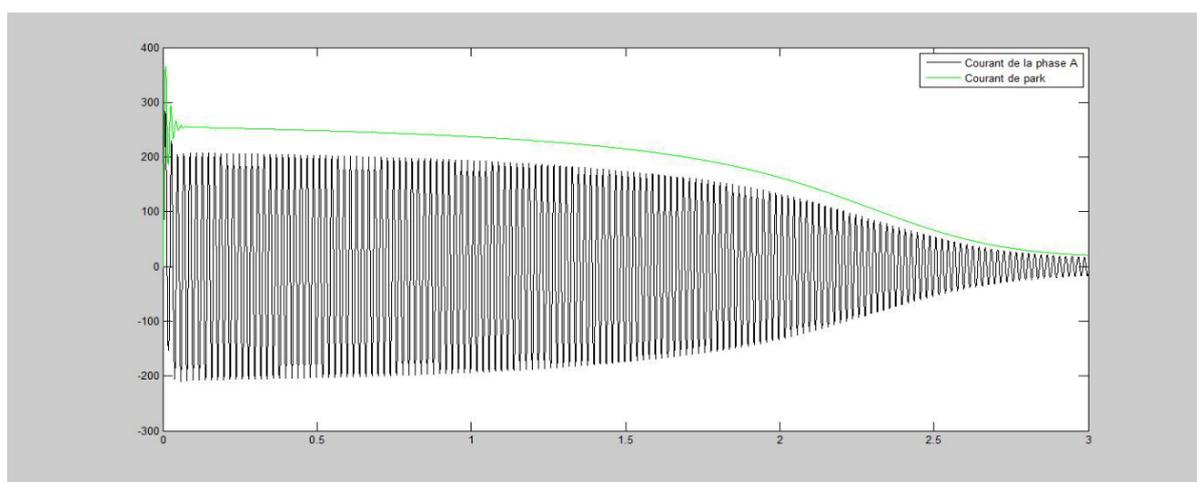
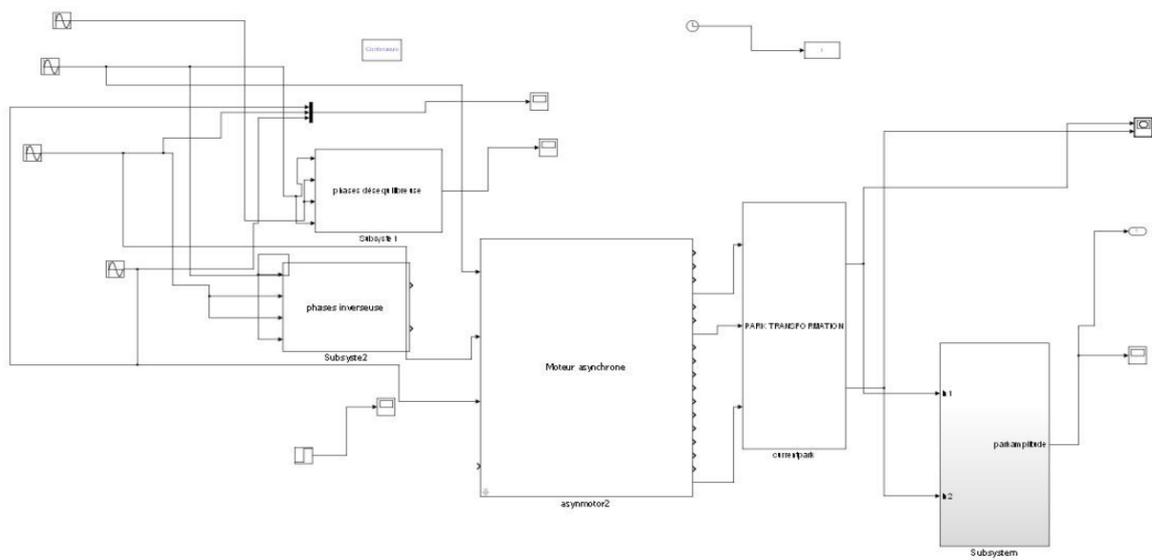
$$i_{sd}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} i_{sa}(t) - \sqrt{\frac{1}{6}} i_{sb}(t) - \sqrt{\frac{1}{6}} i_{sc}(t) \dots \dots \dots (IV.1)$$

$$i_{sq}(t) = \sqrt{\frac{1}{2}} i_{sb}(t) - \sqrt{\frac{1}{2}} i_{sc}(t) \dots \dots \dots$$

Dans le cas du moteur sans défaut, la courbe de Lissajous $i_{sq}(t)$ et $i_{sd}(t)$ à une forme circulaire centrée à l'origine et de diamètre égal à l'amplitude du courant statorique correspondant à l'état de fonctionnement du moteur.

Pour le cas du moteur avec défaut, la courbe de Lissajous change en forme et en épaisseur à cause de la présence des harmoniques créés par le défaut.

La stratégie de cette méthode est de comparer les deux courbes de Lissajous dans les deux cas du moteur avec et sans défaut lors de son fonctionnement.



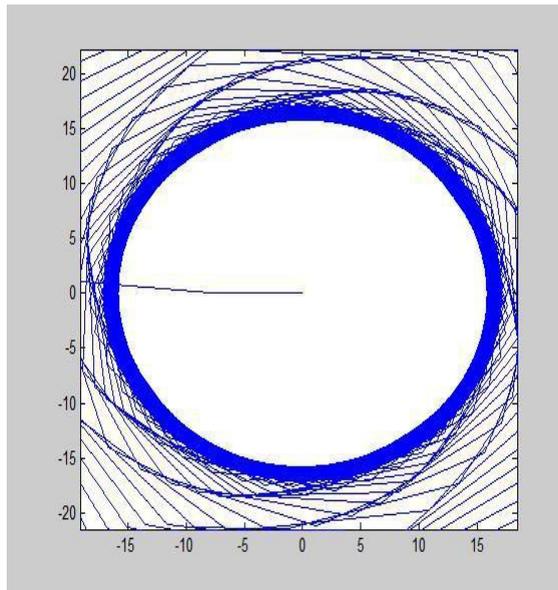


Figure.IV.2 Lissajous de courant de p Lissajous de courant de Park.

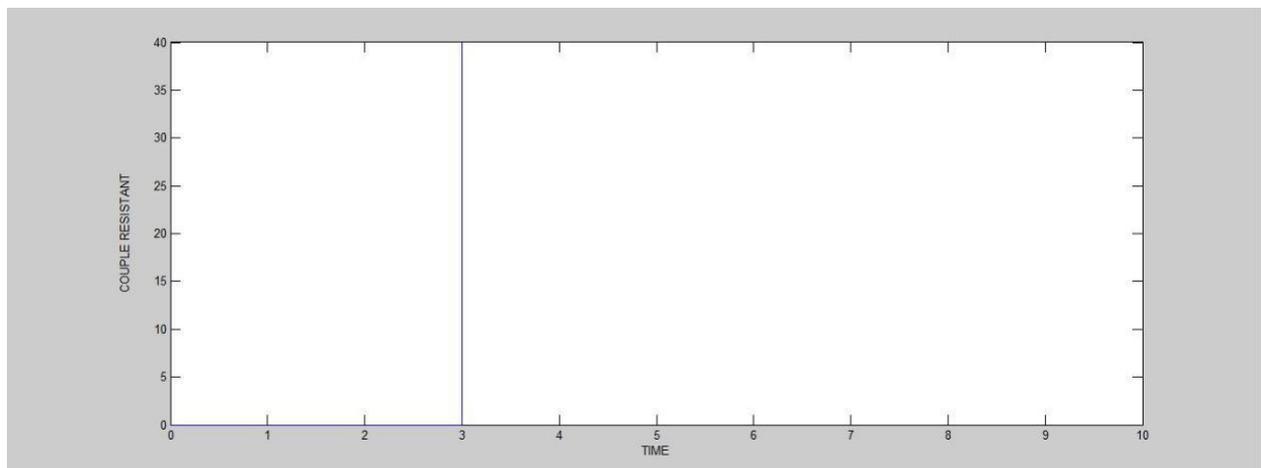


Figure.IV.3 couple résistant 40 nm à l'instant $t=3s$.

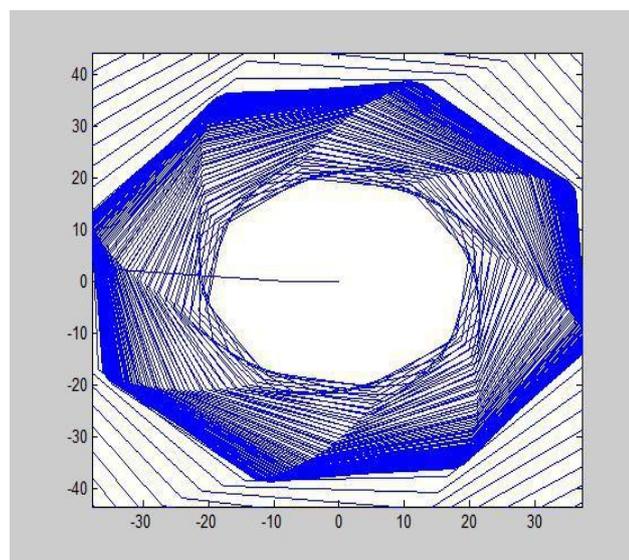


Figure.IV.4 Lissajous de courant de Park avec application d'un couple résistant

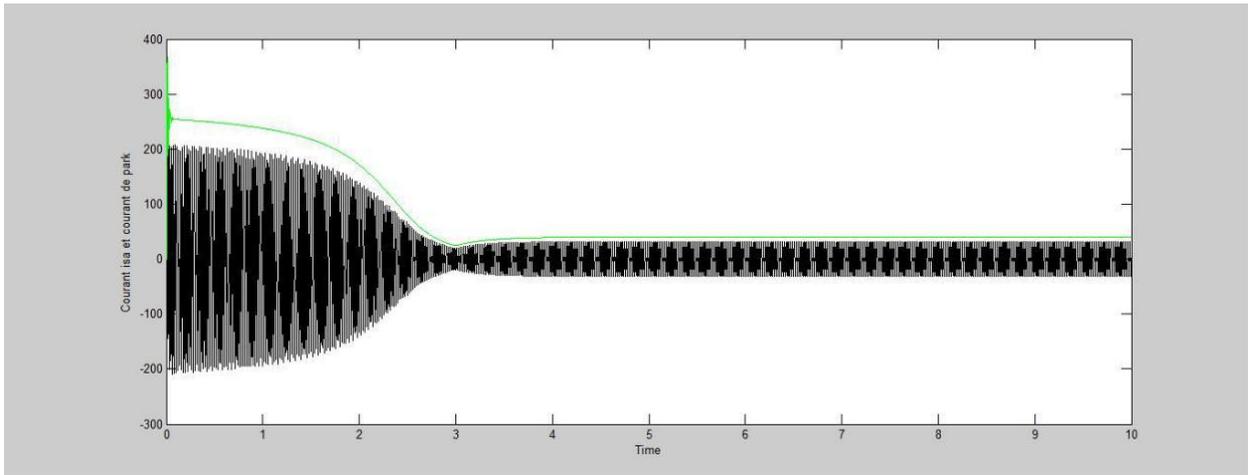


Figure.IV.5 l'effet de couple résistant 40nm sur le courant Isα et courant de Park

IV-3- défaut déséquilibre d'une phase d'alimentation:

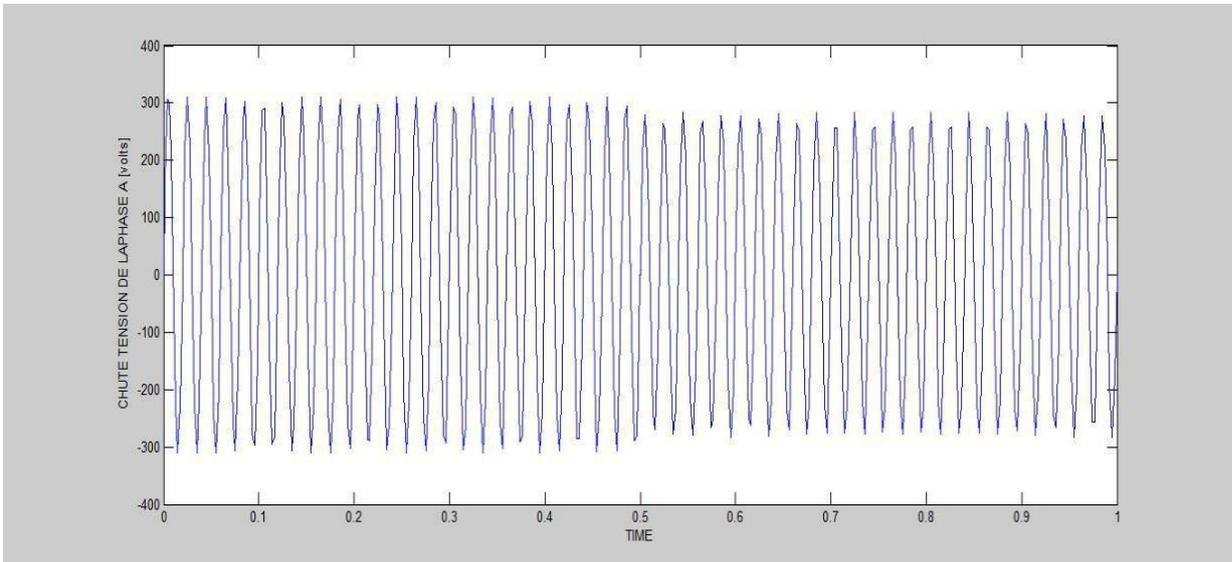
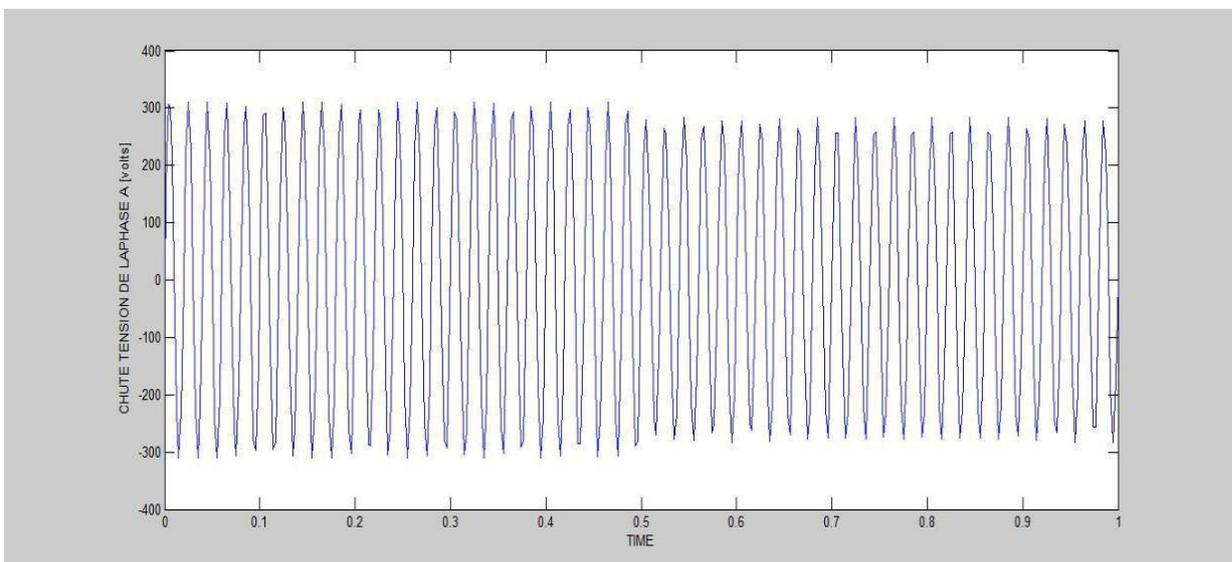


Figure. IV .6 déséquilibre de la phase alimentation va a l'instant 0.5s elle devient ou bien elle chute a 282.84volts a la place de la tension d'alimentation 311.12volts



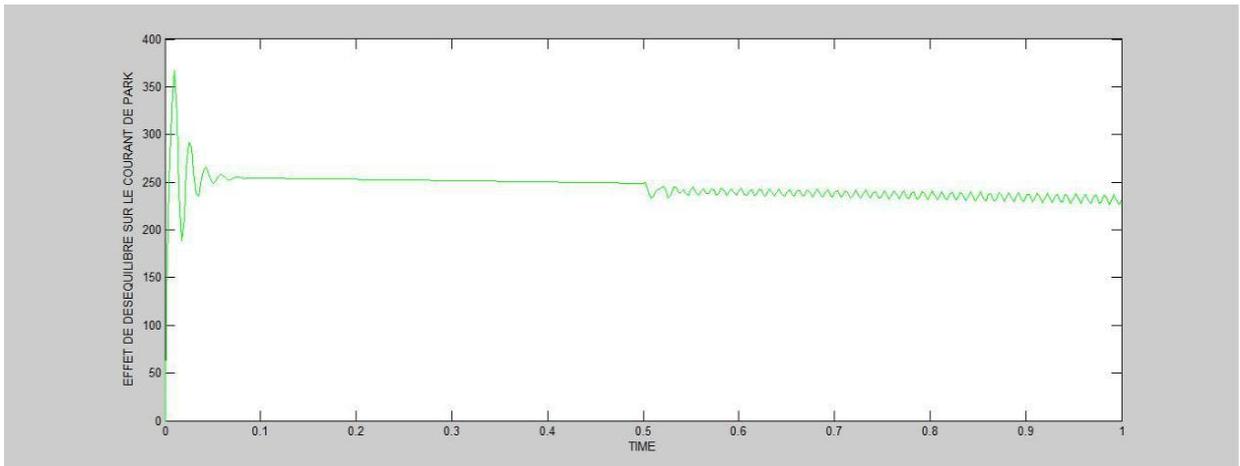


Figure. IV.7 vous voyez bien la détection de défauts de déséquilibre de la phase a. Apparition des ondulations. L'instant $t=0.5s$.

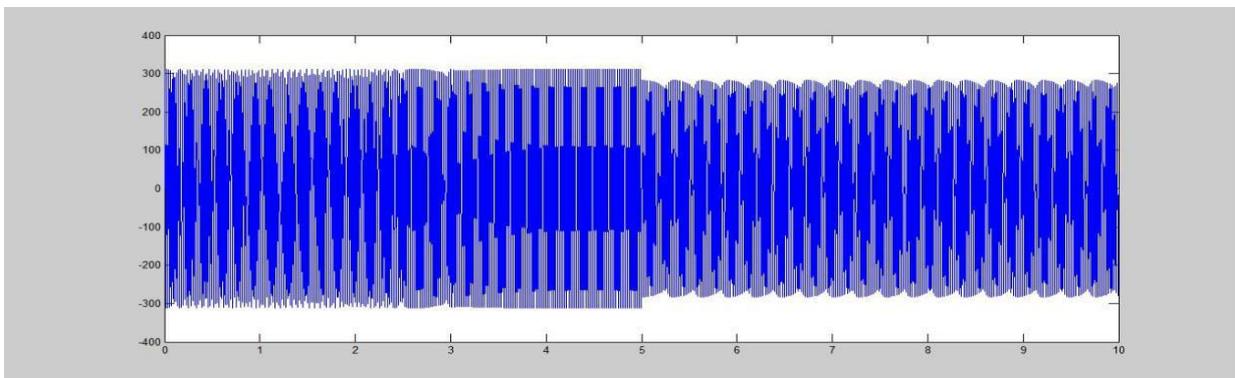


Figure. IV.8 déséquilibre de la phase alimentation va a l'instant $t=5s$ elle devient ou bien elle chute a 282.84volts a la place de la tension d'alimentation 311.12volts

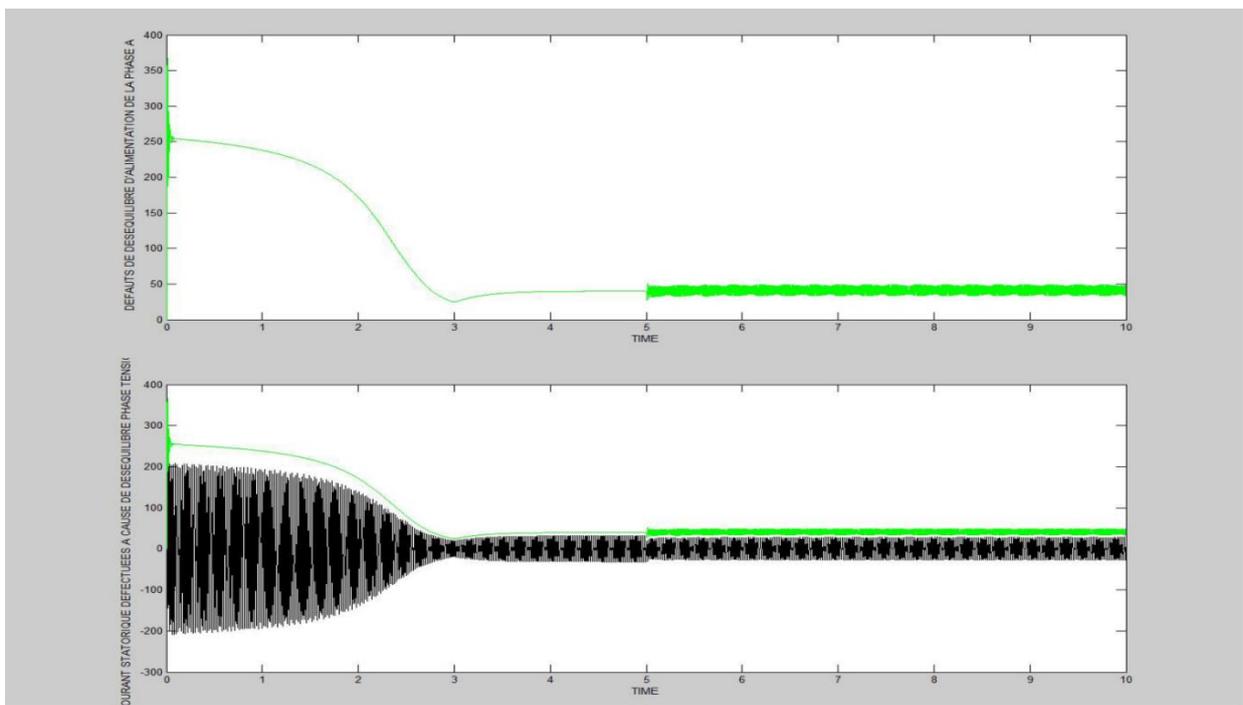


Figure. IV.9 vous voyez bien la détection de défauts de déséquilibre de la phase a. al 'instant $t=5s$. Aussi couple résistant a l'instant $t=3s$

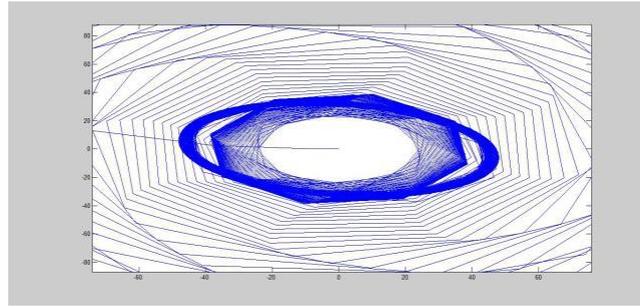


Figure. IV.10 la forme de Lissajous lors de détection de défauts à l' instant $t=5s$

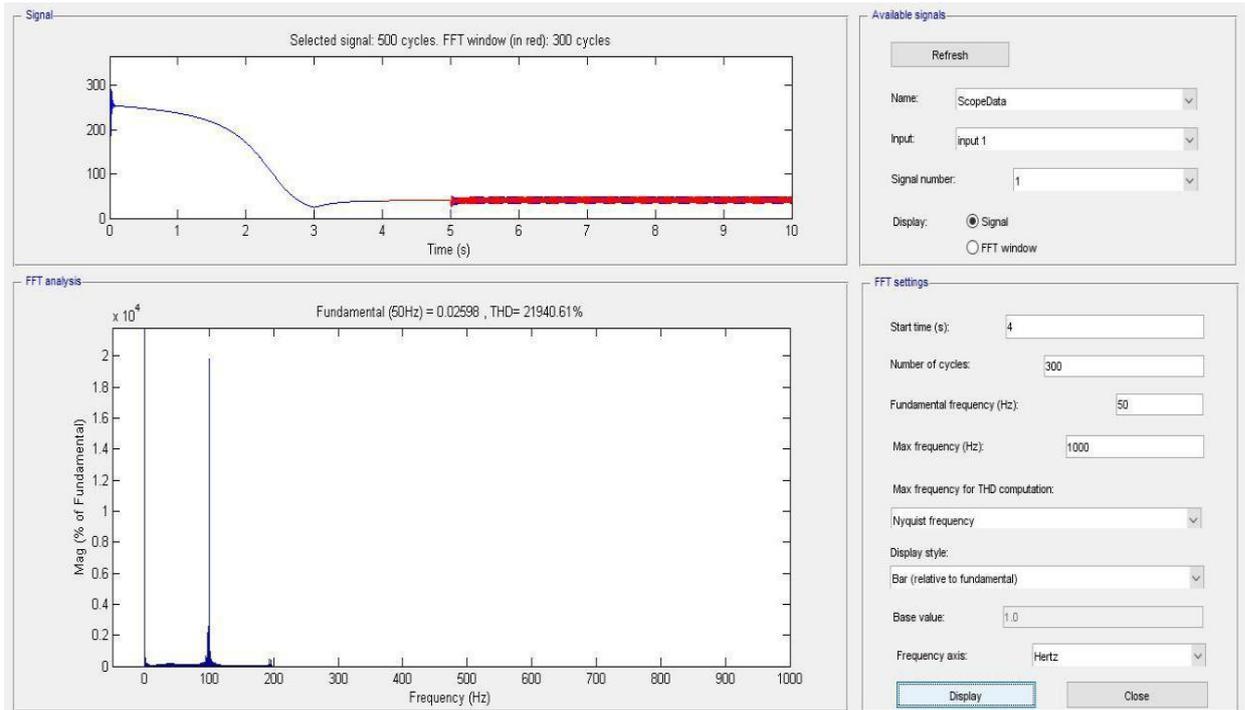


Figure. IV.11 détection de défauts Park de courant de a l'aide fft (les harmoniques)

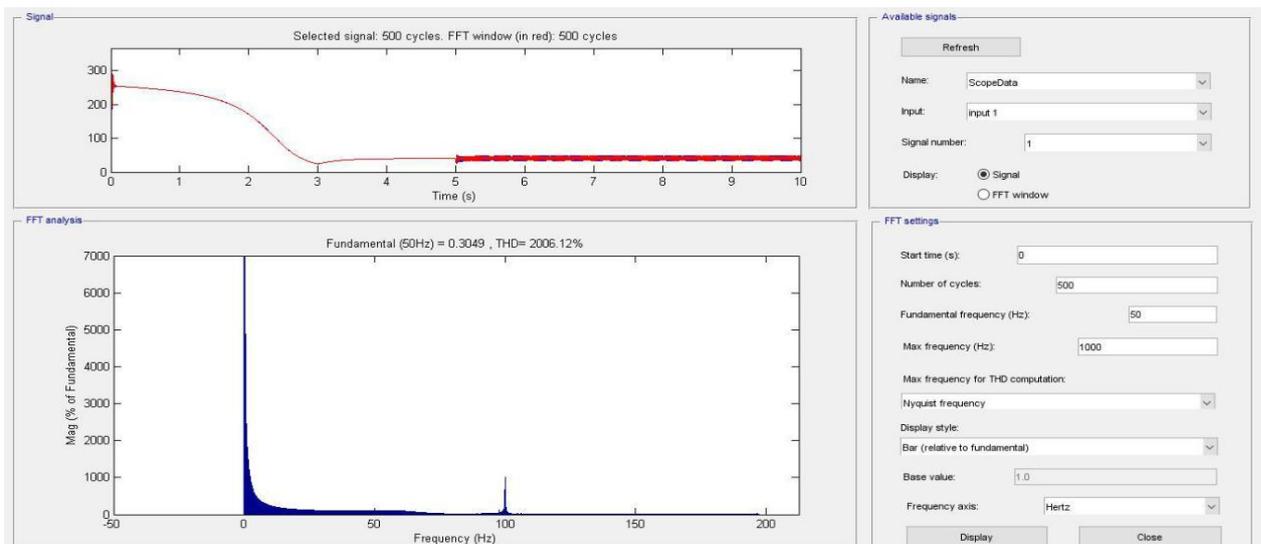


Figure. IV.12 d'après la détection par fft nous voyons bien que l'effet de couple résistant est négligeable devant le défaut de déséquilibre de laphase a.

L'inversion De Phases A Et B

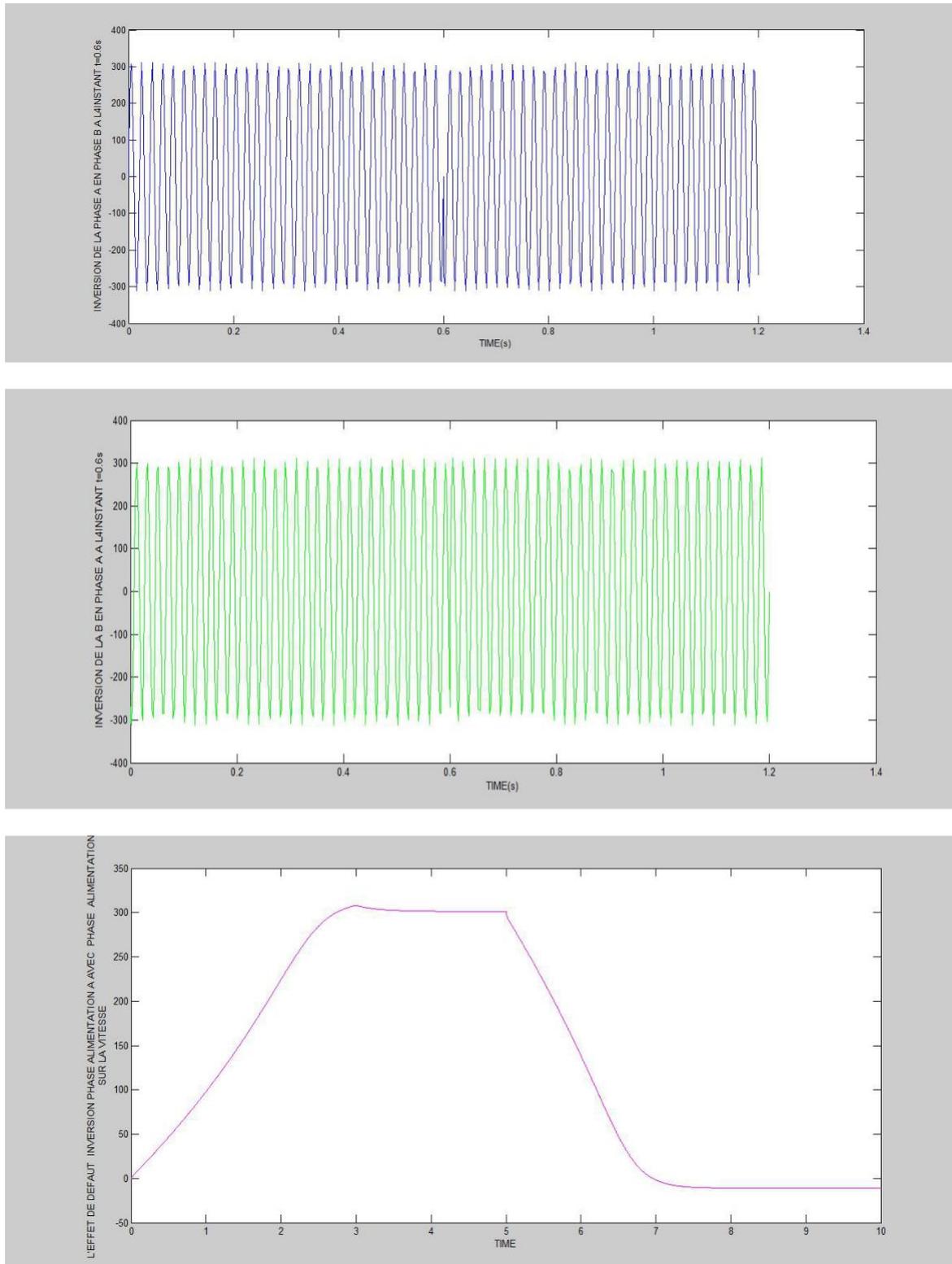


Figure. IV.13 toujours le couple de 40nm est appliquée a l'instant t=3s.

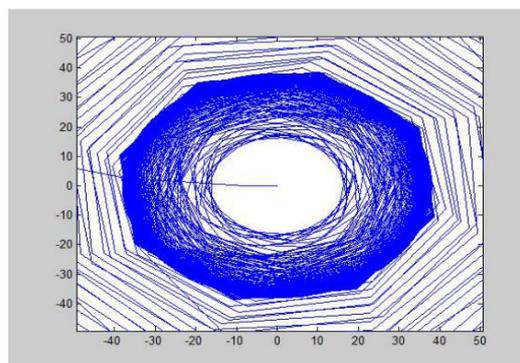
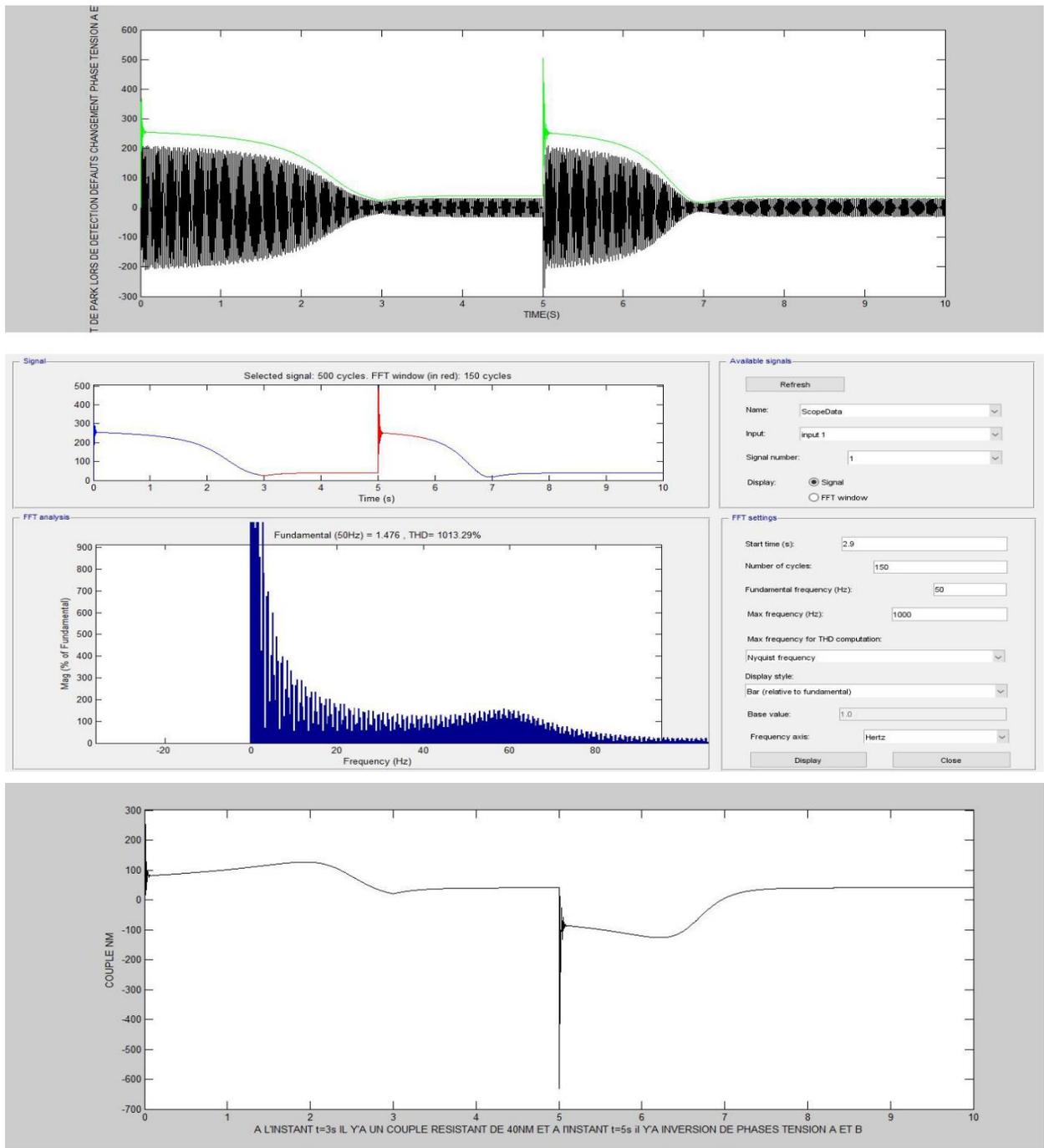


Figure. IV.14 Lissajous détection de défauts de l'inversion de phases a et b

IV.4 Interprétation de résultats 1:

Régime sain : Le principe de fonctionnement de moteur asynchrone triphasée nous nous contentons donc de donner une seule interprétation de leurs fonctionnement en mode sain que ce soit à vide ou en charge. Mais leurs caractéristiques différent puisque chaque machine possède sa propre plaque signalétique. Les figures Figure.IV.2 et Figure.IV.3 à vide : montrent respectivement l'évolution de courant de la phase A, et le courant de Park. En fonction du temps concernant le moteur asynchrone et le lissajou de courant de Park. En charge Figure.IV.4 en appliquant un couple résistant 40 NM A l'instant $t=3s$ la déformation apparaissent sur le lissajou de courant de PARK de la figure IV.5 Figure.IV.6 on voit bien l'influence de ce couple sur le courant I_{sa} et courant de Park.

Régime défaillant : On a introduit, un défaut de type Figure.IV.7 déséquilibre la phase alimentation V_a à l'instant $t=0.5s$ la tension va faire une chute de tension à cause de défaut et deviendra 282.84volts à la place de la tension d'alimentation 311.12 volts et sur Figure.IV8 vous voyez bien le défaut de déséquilibre de la phase à l'instant $t=0.5s$ des oscillations apparaisse sur le courant de Park. Figure.IV.12detection de défauts Park de courant à l'aide FFT ou on détecte les harmoniques qui ont un effet négatif sur le fonctionnement de notre moteur.

IV-5 détection défaut par filtrage Hilbert :

IV.5.1 Introduction

Pour détecter la présence de défauts dans le rotor d'une machine à induction, des méthodes de diagnostic sont classiquement basée sur l'analyse des signaux de fréquence des signaux révélateurs.

Il est habituel d'utiliser le module de la transformée de Fourier du courant absorbé par la machine pour détecter la présence de ce type de défaillance. En effet, une comparaison de l'amplitude du défaut composant signataires avec un seuil de référence (seuil calculé lorsque la machine est saine) permet de détecter la présence.

Dans cette étude, nous montrons qu'il est possible d'améliorer le diagnostic de la machine en exploitant les informations données par la transformée de Hilbert appliquée au spectre d'amplitude du courant statorique. [40]

IV.5.2 Approche Hilbert (filtre Hilbert):

En effet, l'approche classique de l'estimation de la fréquence instantanée est basée sur le signal analytique et la transformée de Hilbert. Un signal analytique est un signal qui n'a pas de composantes fréquentielles négatives. La transformée de Hilbert. Est utilisée pour créer une classe spéciale de signaux causals. Appelés analytiques. Les signaux analytiques aident à représenter les signaux à bande étroite comme les signaux complexes qui ont des propriétés particulièrement attirantes pour le traitement du signal. La transformée de Hilbert a été largement exploitée soit pour calculer l'enveloppe d'un signal et en particulier dans la détection des défauts de roulements [41], ou pour déduire la fréquence instantanée qui a été utilisée dans le calcul de la vitesse instantanée de l'arbre [42].

Soit un signal $x(t)$ appliqué à un filtre analytique de réponse i pulsionnelle $k(t)$.

$$K(t) = 1 / t \pi = H(t). \quad (IV.2)$$

$$H[x(t)] = x(t) \otimes k(t). \quad (IV.3)$$

Transformée de Hilbert dans la théorie de la modulation En plus du π déphasage qu'il introduit entre les parties réelles et imaginaires, la transformée de Hilbert peut être utilisée dans la théorie de la modulation pour déterminer l'amplitude, modulation de phase et modulation de fréquence d'un signal $Z(t)$ dépendant du temps. La transformée de Hilbert d'un signal $Z(t)$ peut s'écrire:

Un signal analytique $Z(t)$ a un spectre qui n'existe que dans le domaine de fréquence positif et s'exprime par :

$$Z(t) = x(t) + jH(x(t)). \quad (IV.4)$$

Il existe une autre écriture de signal analytique sous forme d'une exponentielle, cette écriture est utilisée pour simplifier les calculs d'un signal complexe. A partir du signal analytique, on peut calculer la phase instantanée et la fréquence instantanée du signal.

$$H(x(t))=y(t)=1/\pi t \times x(t). \quad (IV.5)$$

L'amplitude instantanée de Hilbert est:

$$\text{Hilbert}=y(t)=1/\pi t \times \text{isa}(t) \quad (IV.6).$$

Nous pouvons créer un signal complexe :

$$Z(t) = \text{isa}(t) + jy(t). \quad (IV.7)$$

Où $y(t)$ est le résultat de l'application transformée de Hilbert sur le signal de courant statorique $\text{isa}(t)$ de la phase a.

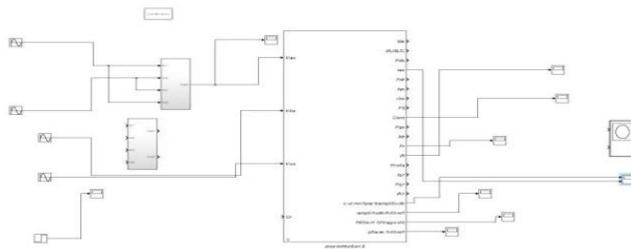
Avec:

L'amplitude instantanée :

$$A_z = (\text{isa}^2 + y(t)^2)^{1/2}. \quad (IV.8)$$

Et la phase $\phi_z = \arctan(y(t)/\text{isa}(t)) \quad (IV.9) \quad [43].$

Détection défaut par filtrage Hilbert :



SIMULATION HILBERT DETECTION DE DEFAUTS MOTEUR ASYNCHRONE

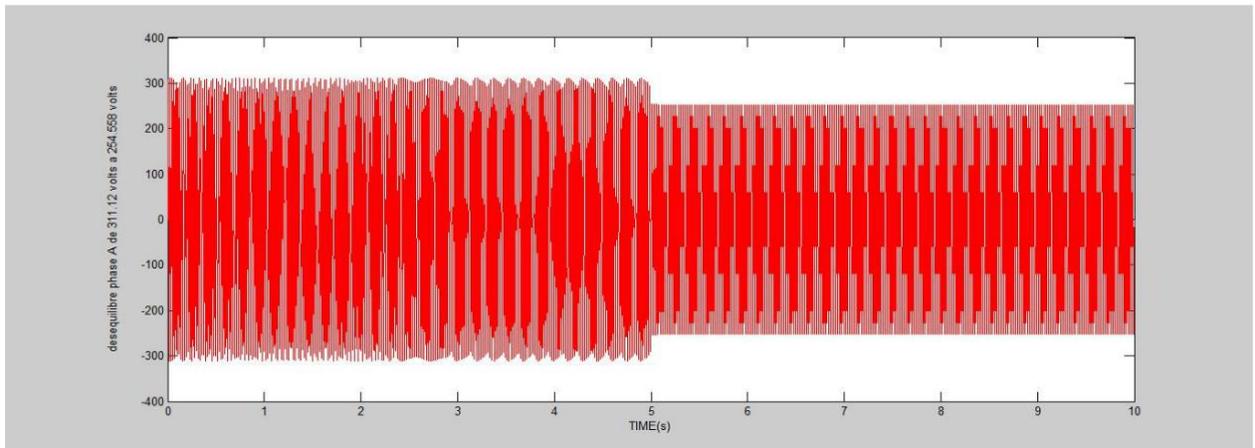


Figure. IV.15 défauts déséquilibre des tensions la phase a déséquilibrée : la phase a=311.12volts jusqu'à elle chute et devient à l'instant $t=5s$ 254.558 volts et les autres phases b et c sont égales a 311.12 pas de chute de tension

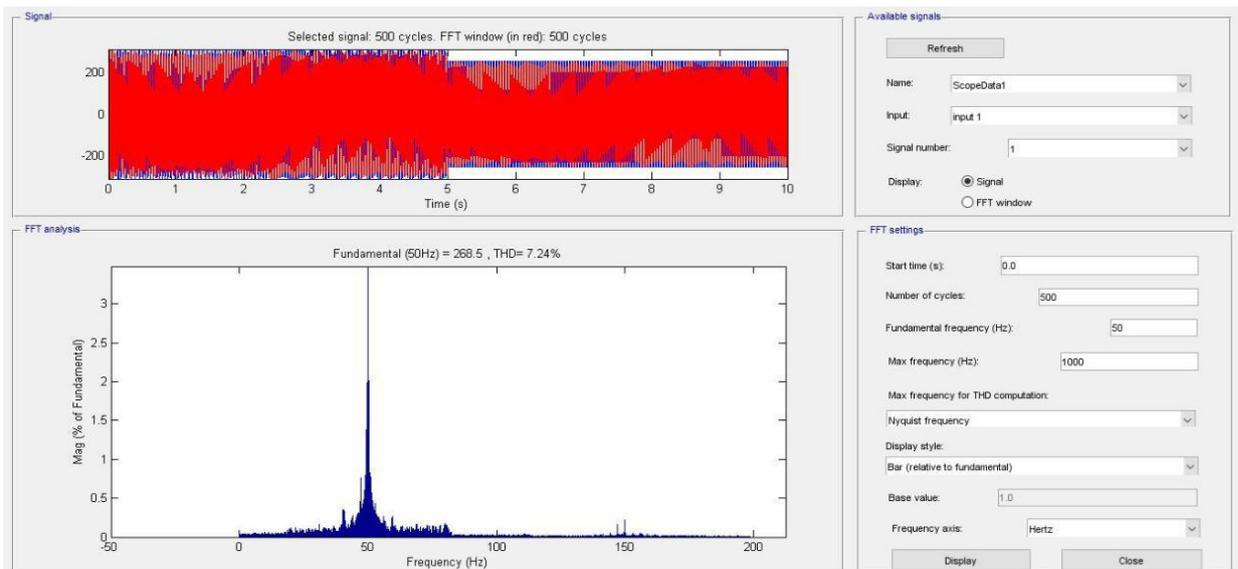


Figure. IV.16 défauts déséquilibre des tensions la phase a déséquilibrée : la phase a=311.12volts jusqu'à elle chute et devient à l'instant $t=5s$ 254.558 volts et les autres phases b et c sont égales a 311.12 pas de chute de tension

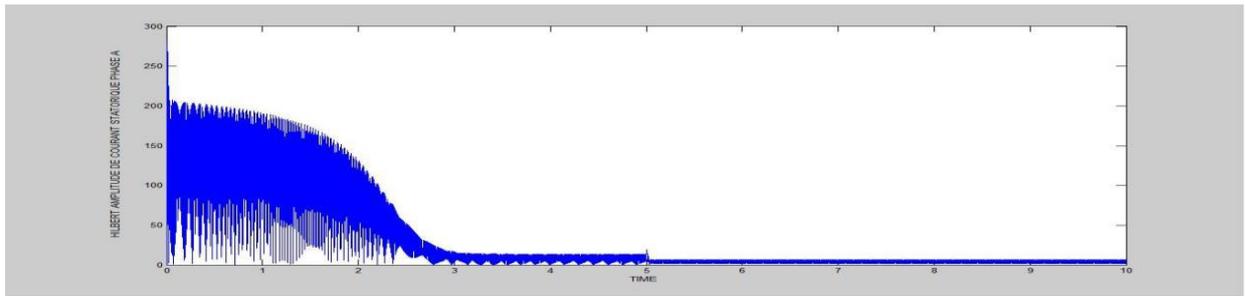


Figure. IV.17 amplitude de Hilbert

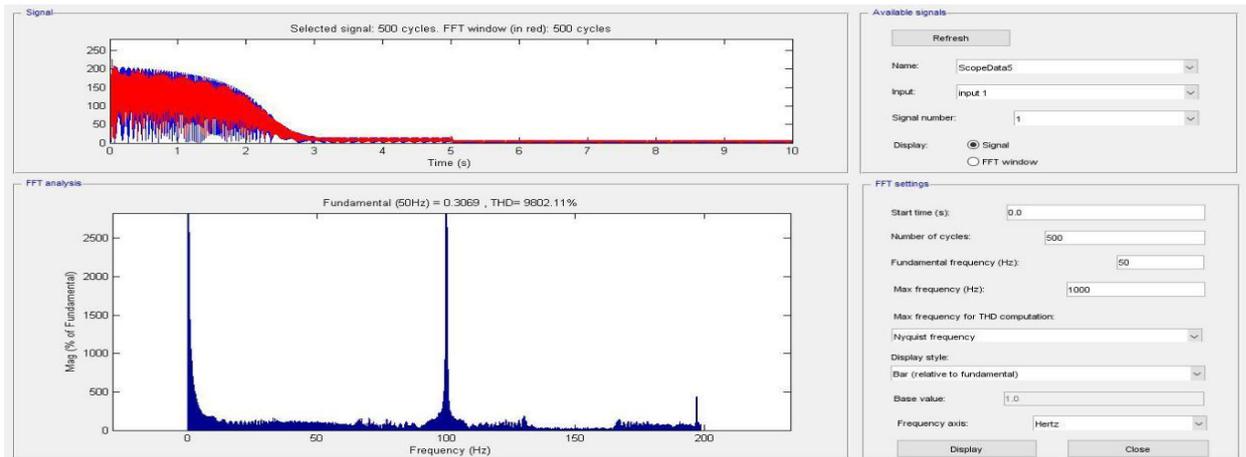
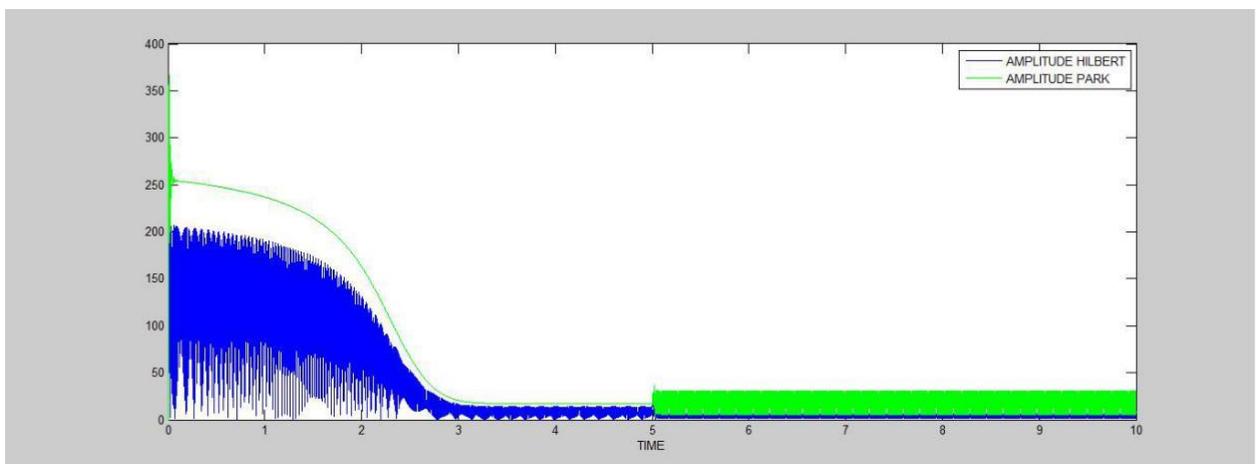


Figure. IV.18 amplitude de Hilbert détection défaut par fft



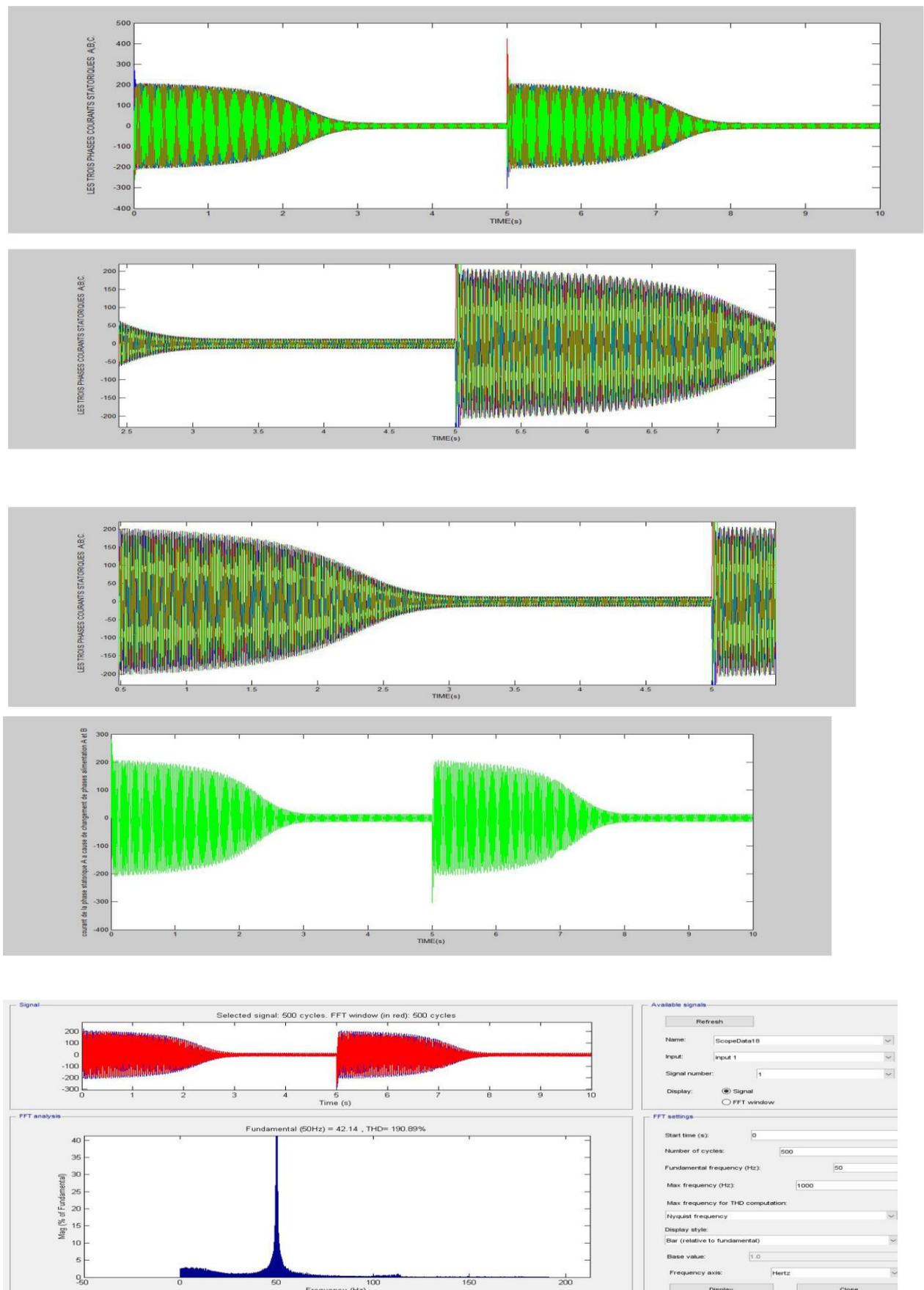


Figure. IV.19 détection défauts inversion phases a et b filtre Hilbert

Defaut court -circuits :

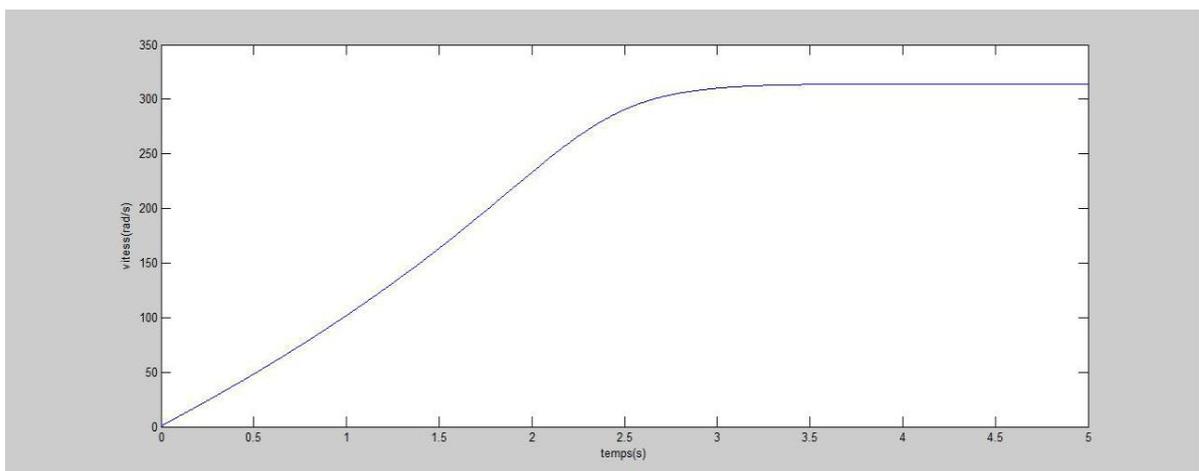
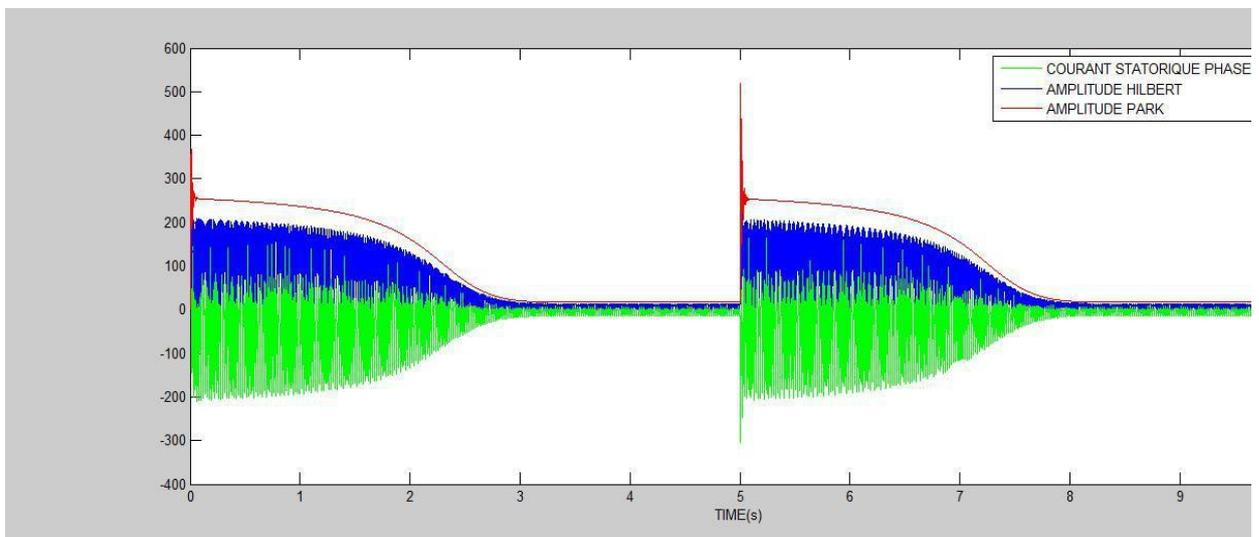


Figure. IV .20 vitesse sans court- circuit

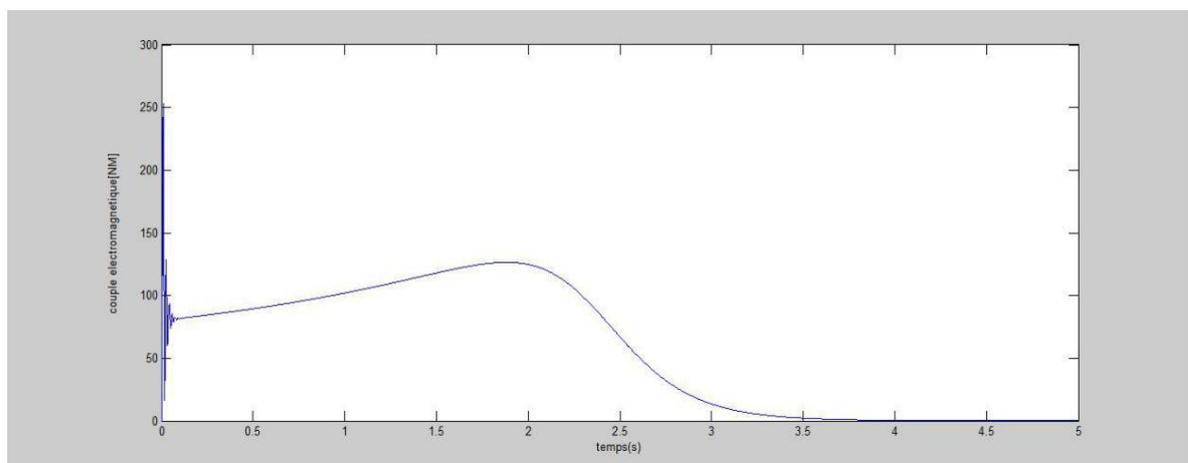


Figure. IV.21 couple sans courts- circuit

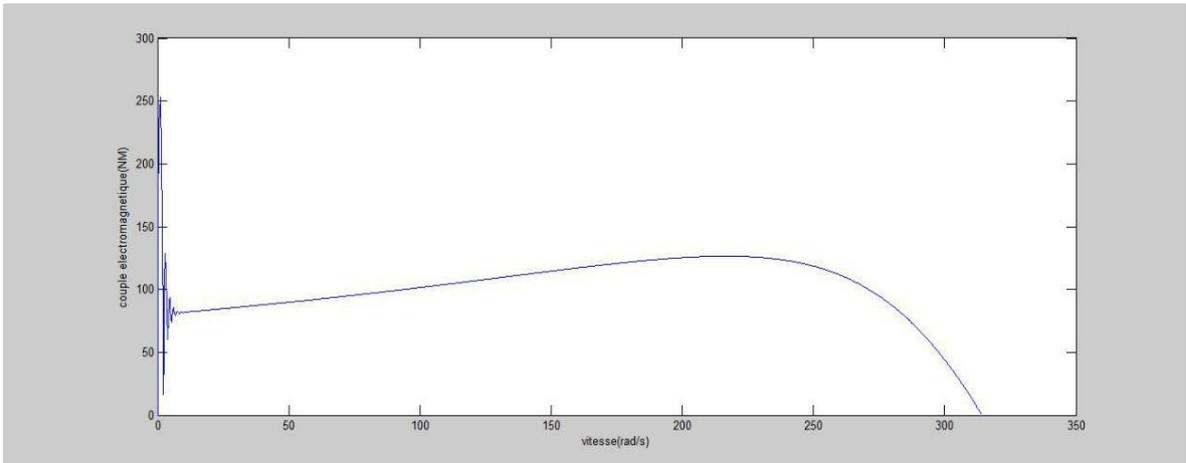


Figure. IV.22 couple électromagnétique=f(vitesse) sans défaut

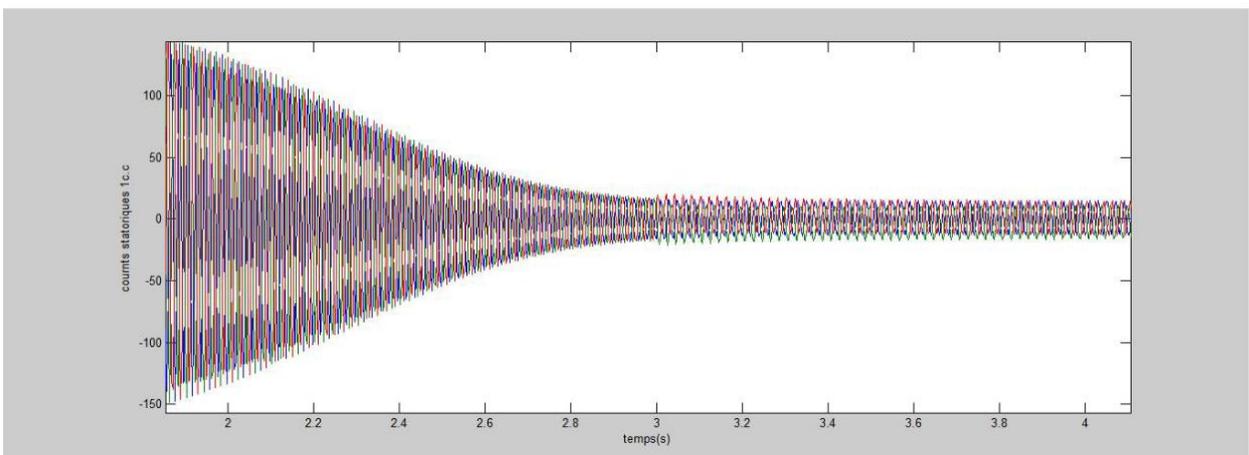
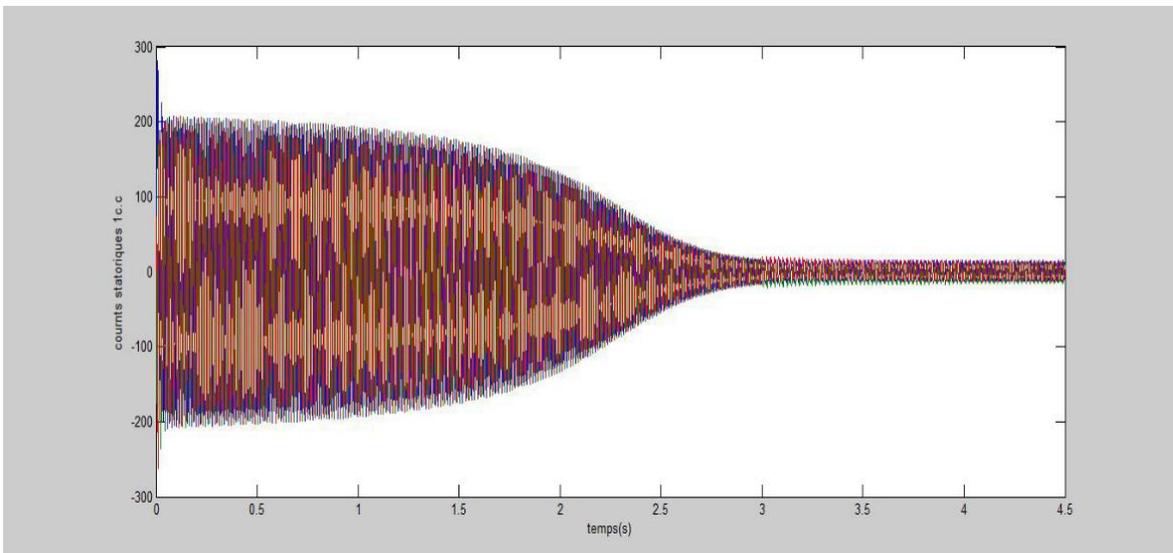


Figure. IV.23 Les courants statoriques ave 1cc

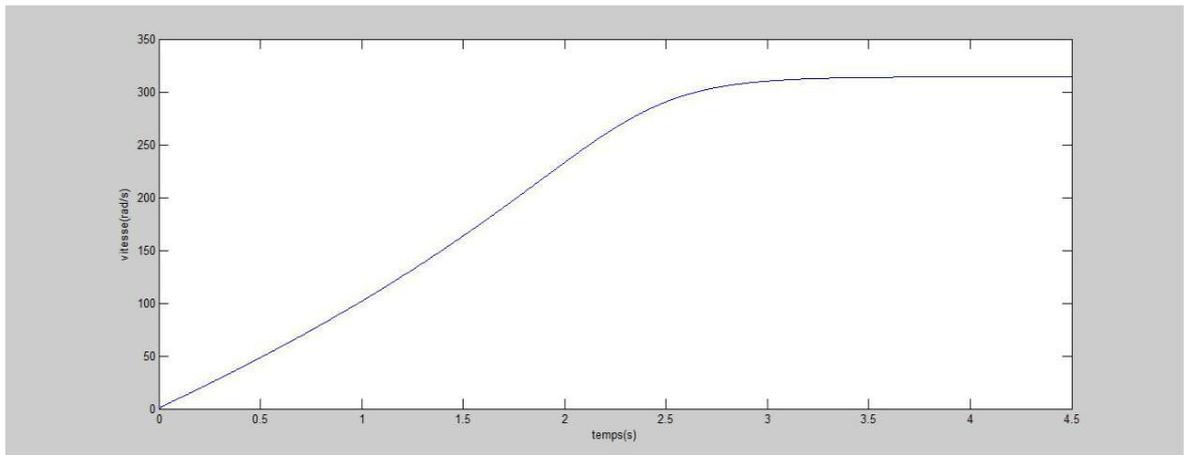


Figure. IV.24 Courbe vitesse 1court-circuit t=3s

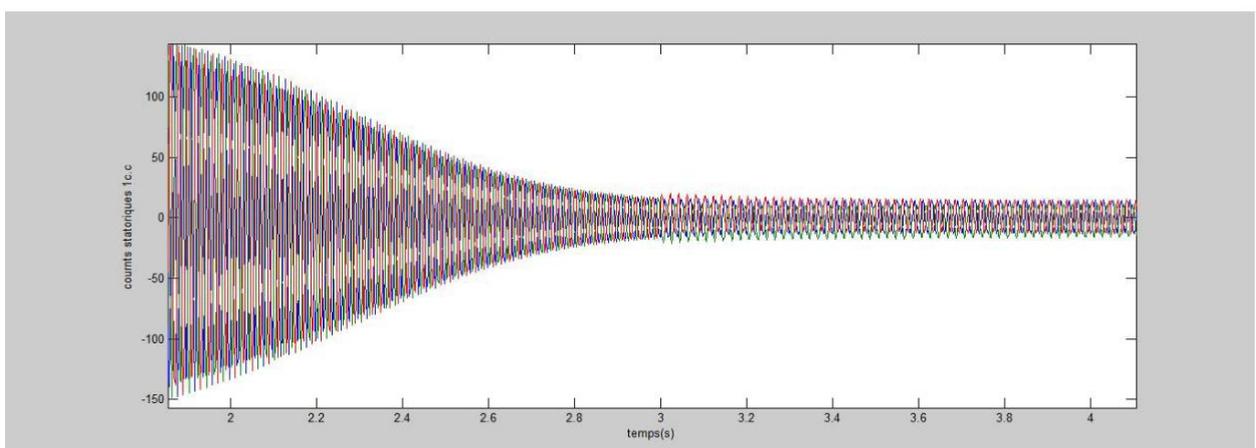
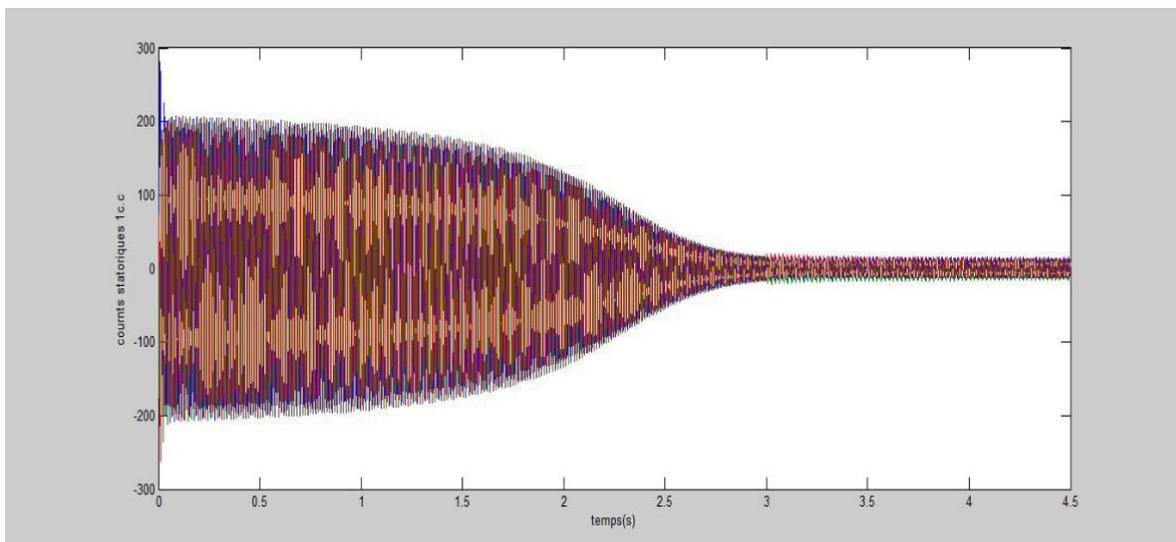


Figure. IV.25.courbe couple 1court-circuit t=3s

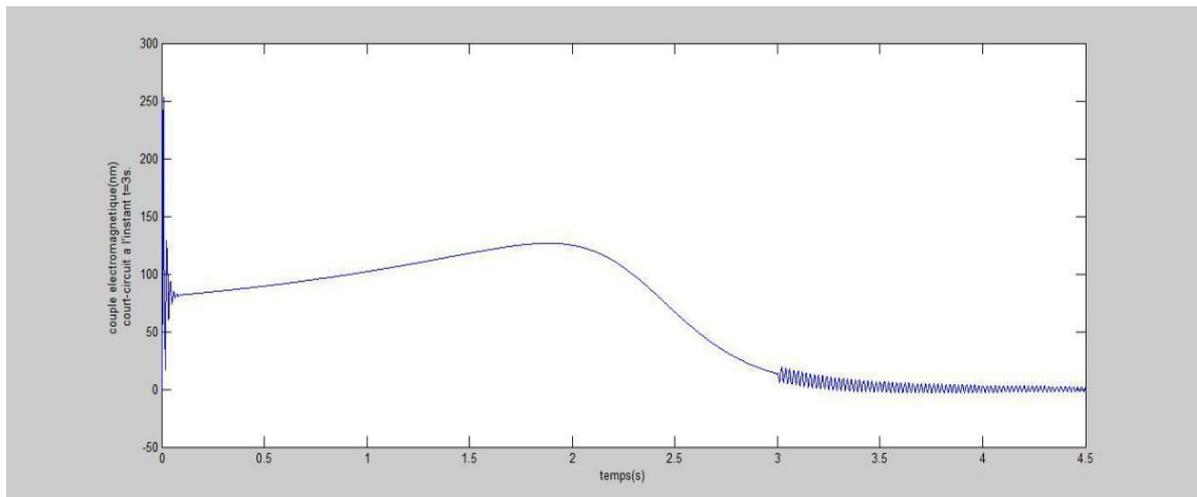


Figure. IV.26 courbe couple 1court-circuit t=3s

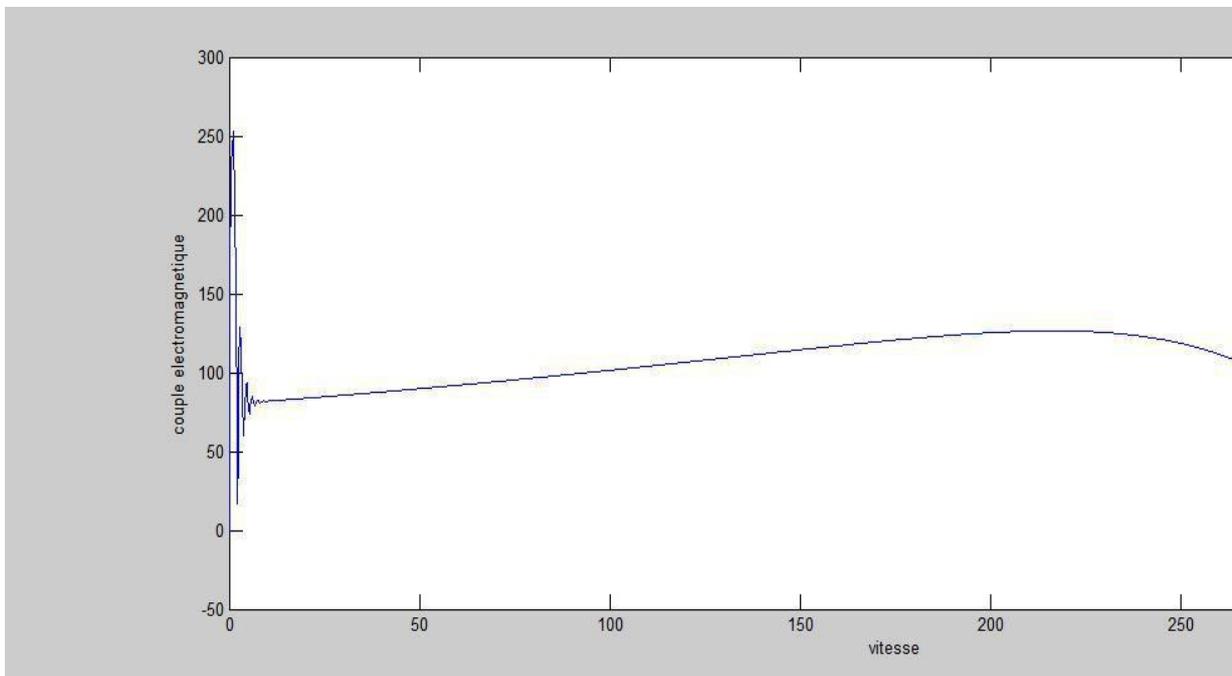


Figure. IV.27 couple électromagnétique=f(vitesse) avec défaut 1c.c

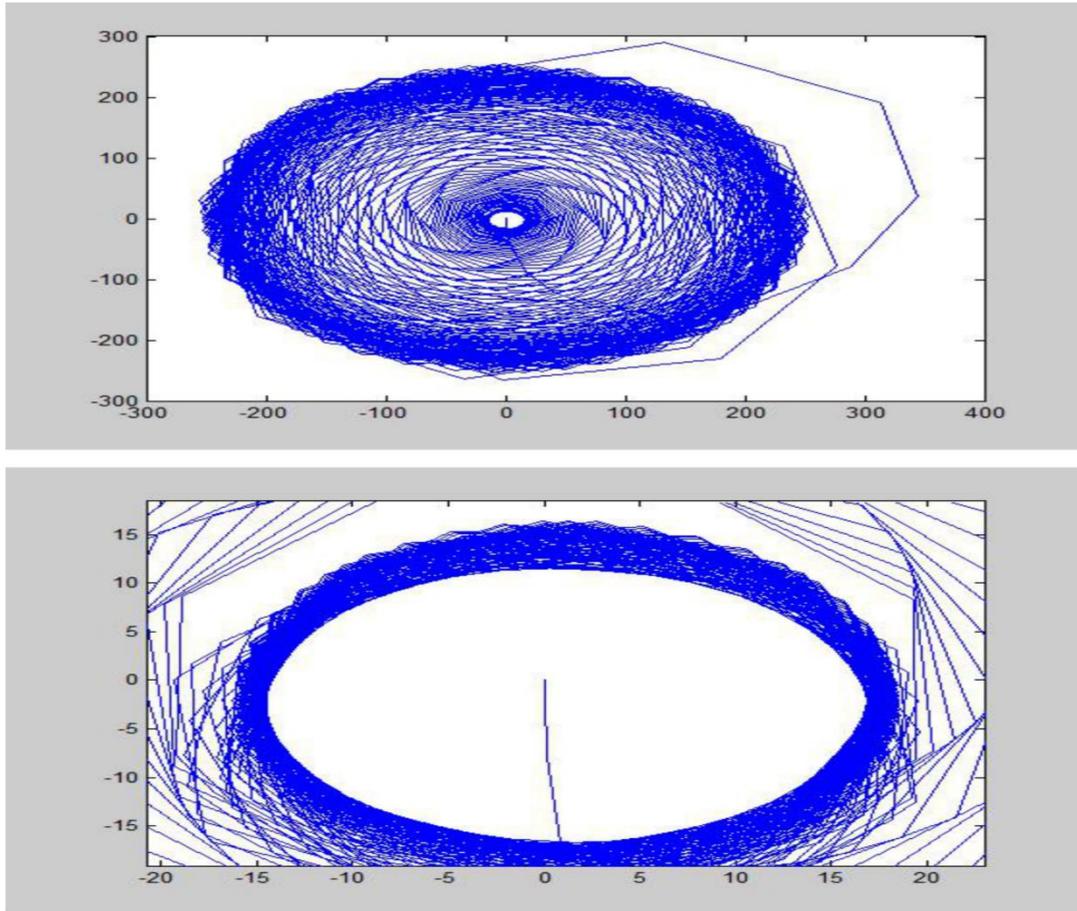


Figure. IV.28 déformation Lissajous a cause de 1 cc.

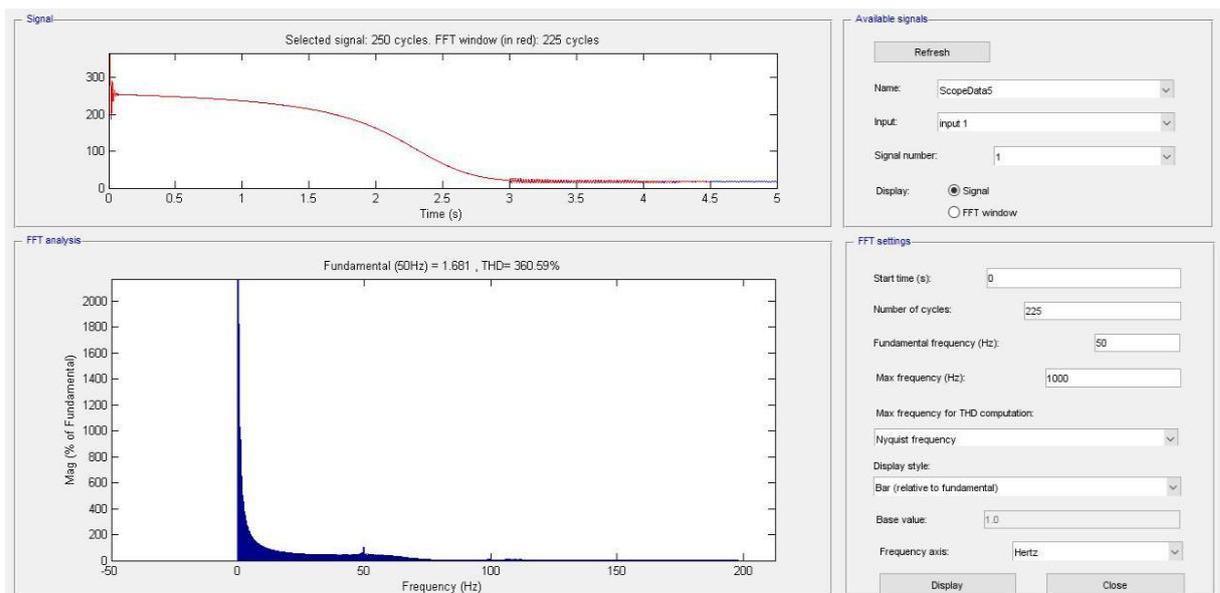


Figure. IV.29 enveloppe de Park amplitude avec fft pour détection de défaut 1c.c

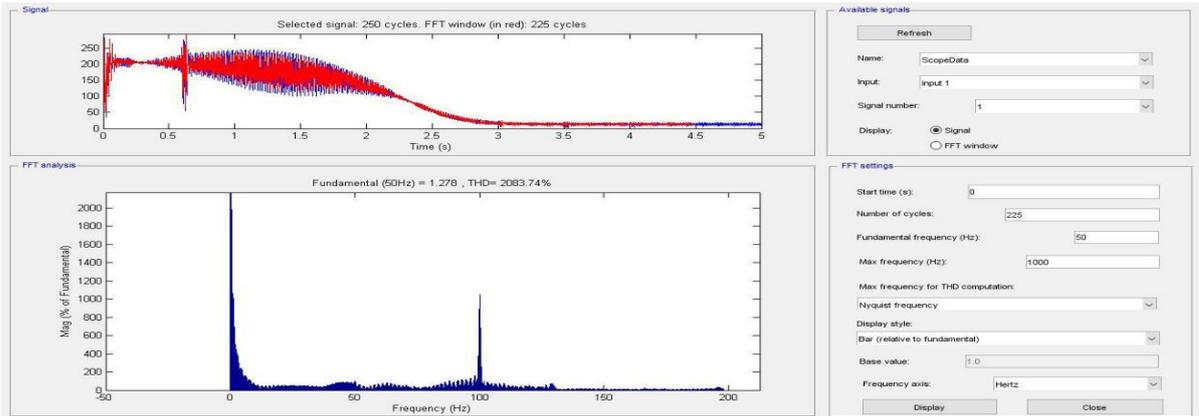


Figure. IV.30 enveloppe de Hilbert amplitude avec fft pour détection de défaut 1c.c

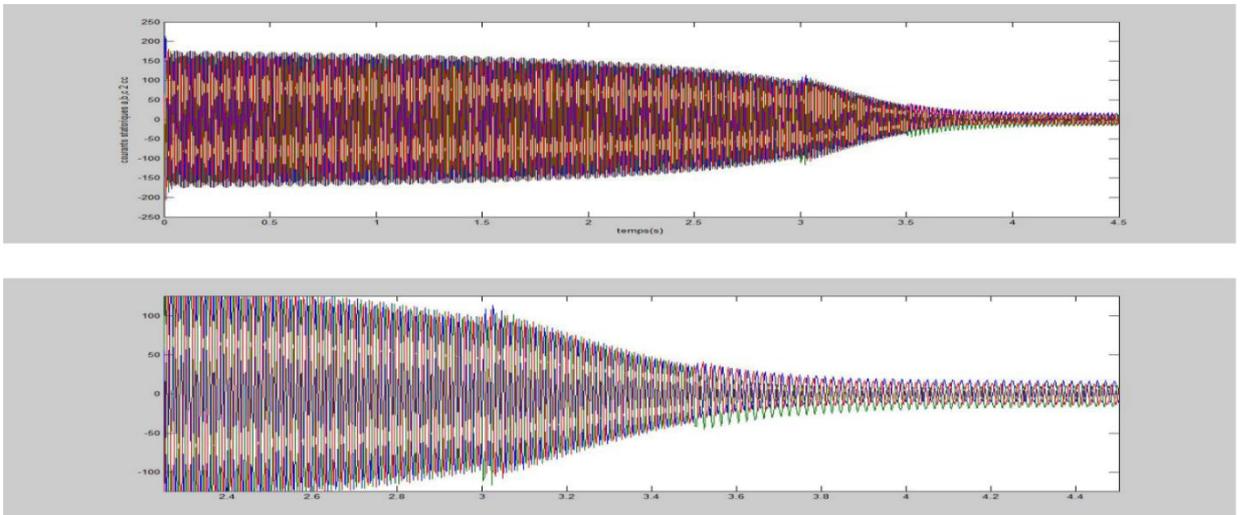


Figure. IV.31 les courants statoriques 2cc

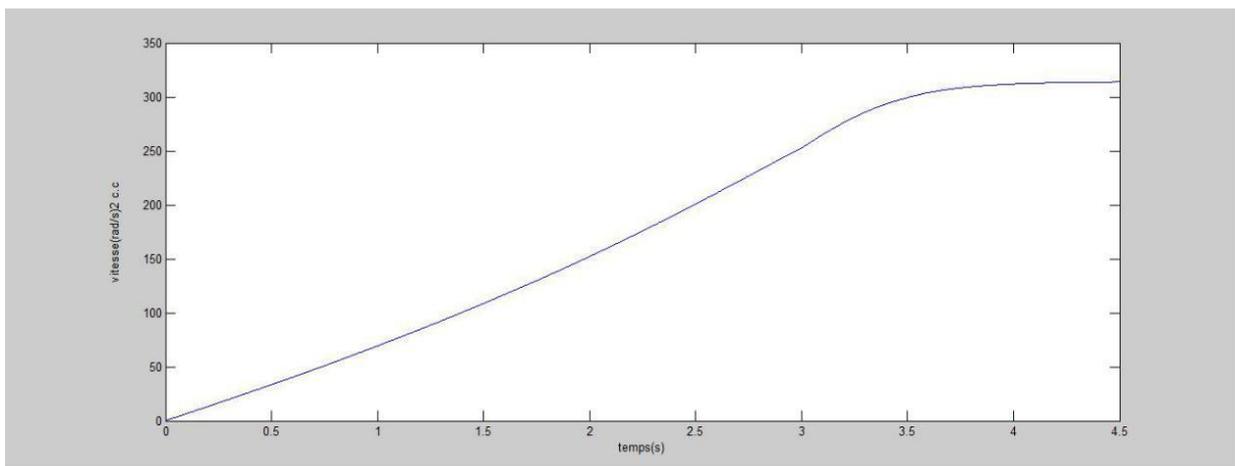


Figure. IV.32 courbe vitesse 2 court-circuit successives t=3s et t=3.5s

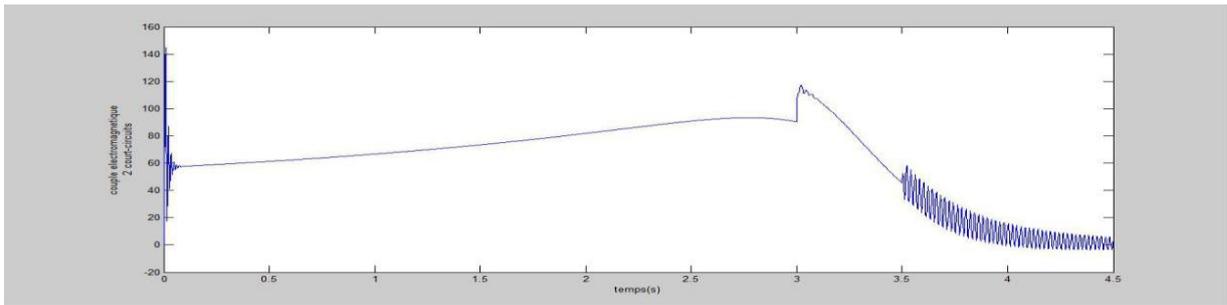


Figure. IV .33 Courbe couple 2court-circuits successives t=3s et t=3.5s

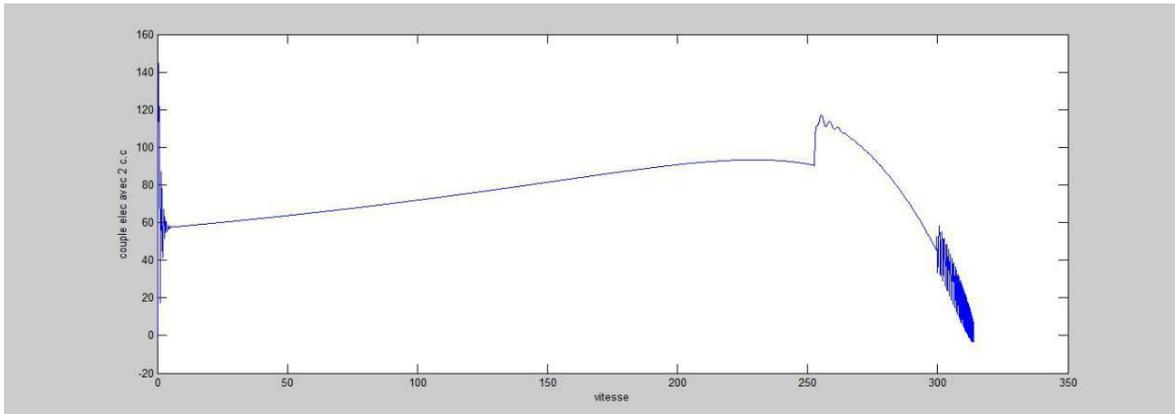


Figure. IV.34 couple électromagnétique=f (vitesses) avec défaut

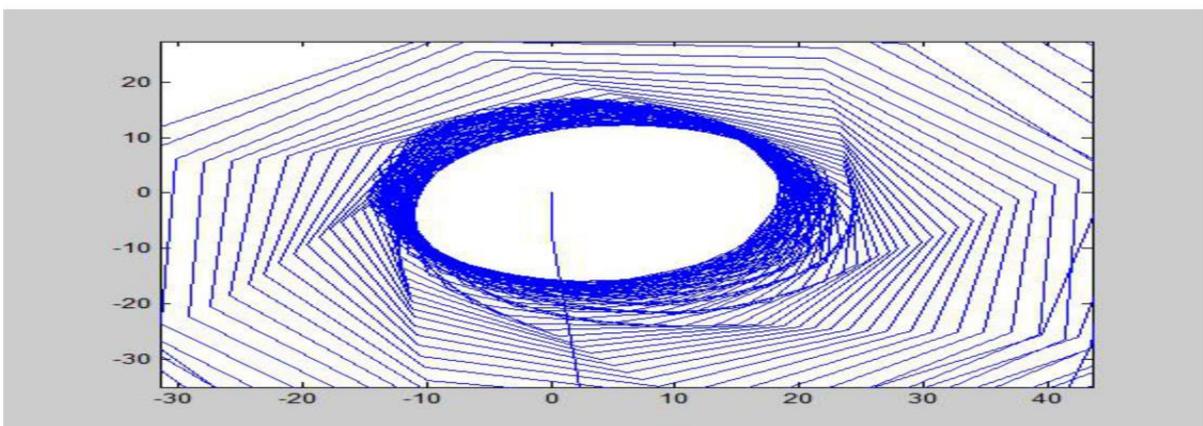
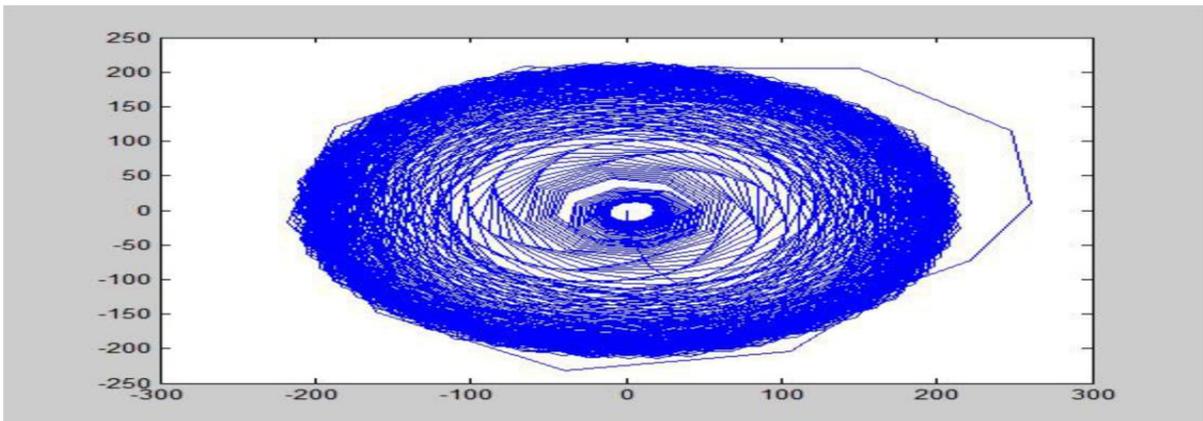


Figure. IV.35déformation Lissajous à cause de 2 c.c

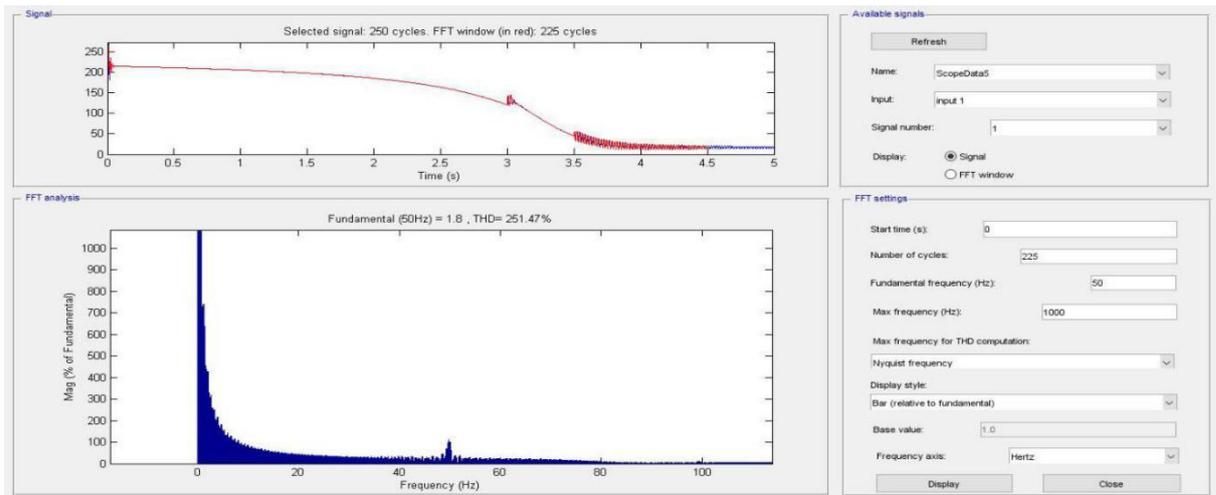


Figure. IV.36 enveloppe de Park amplitude avec fft pour détection de défaut 2c.c

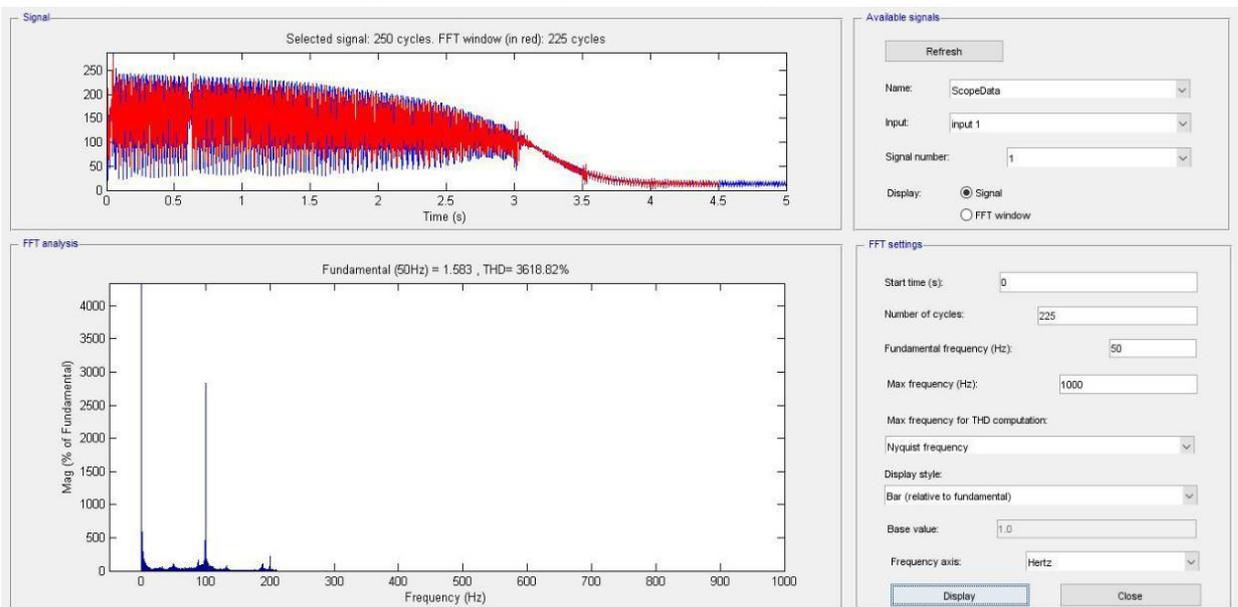
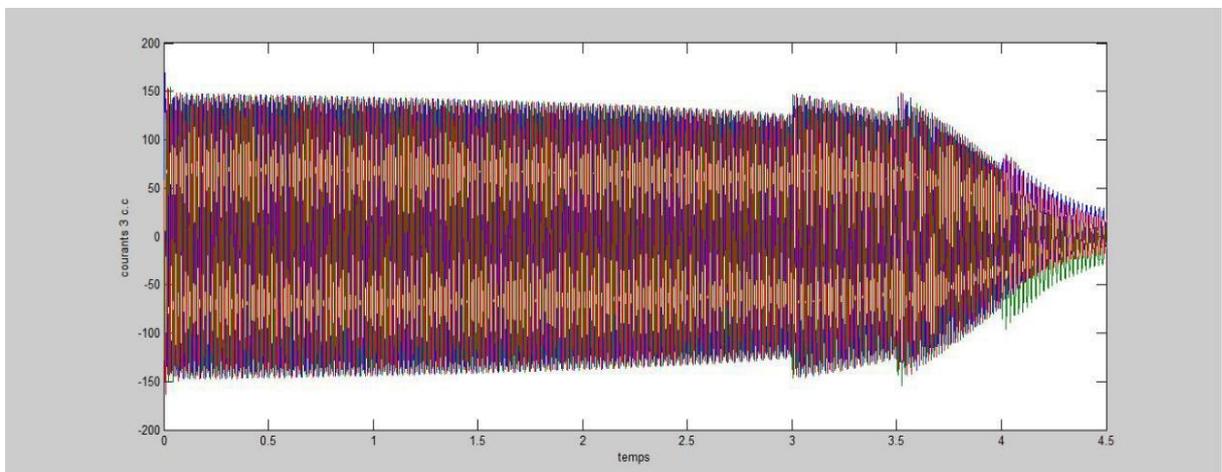


Figure. IV .37 enveloppe de Hilbert amplitude avec fft pour détection de défaut 2c.c



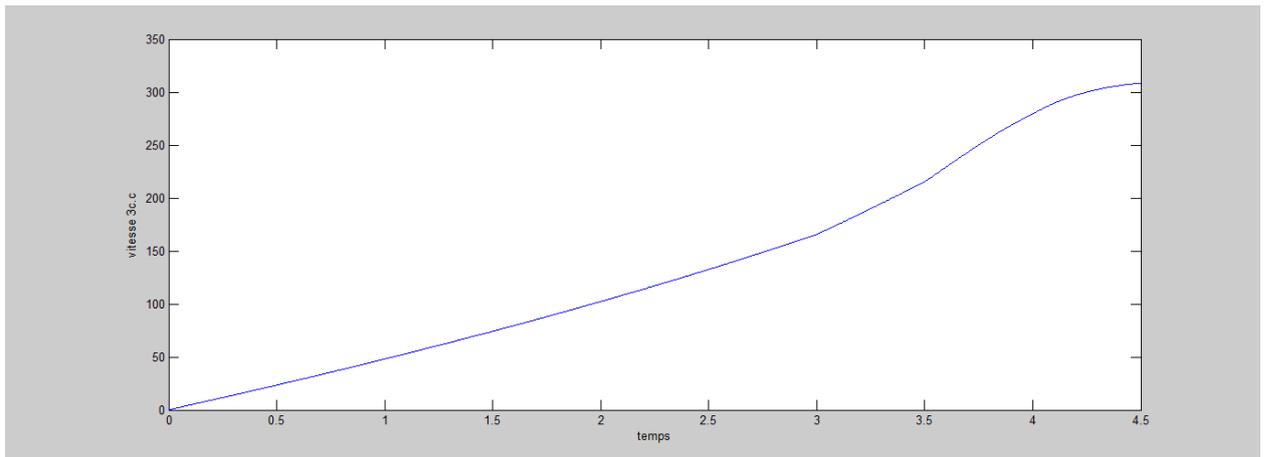


Figure. IV.38 : vitesse de rotation (rad/s)

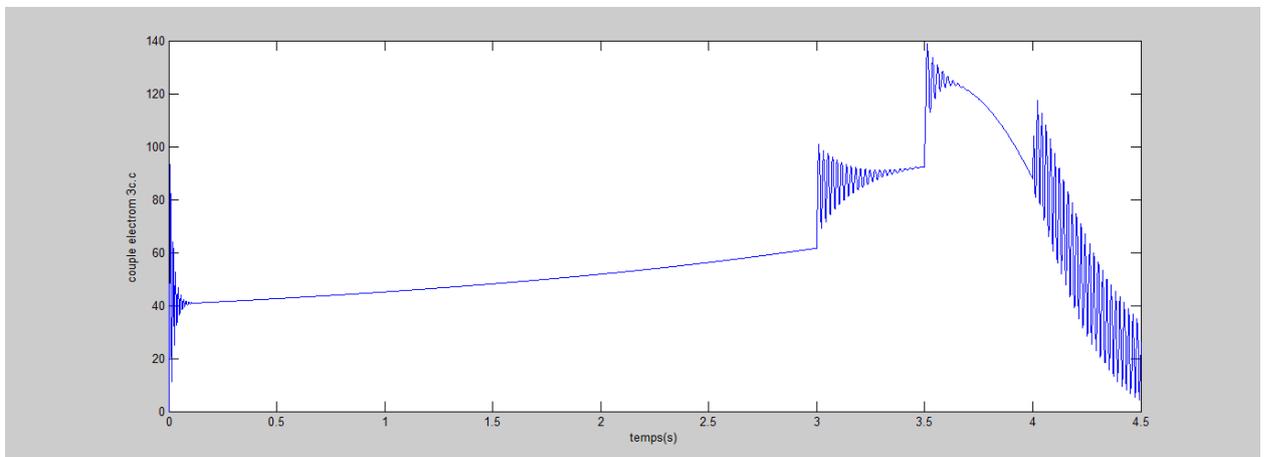


Figure. IV.39: couple électromagnétique

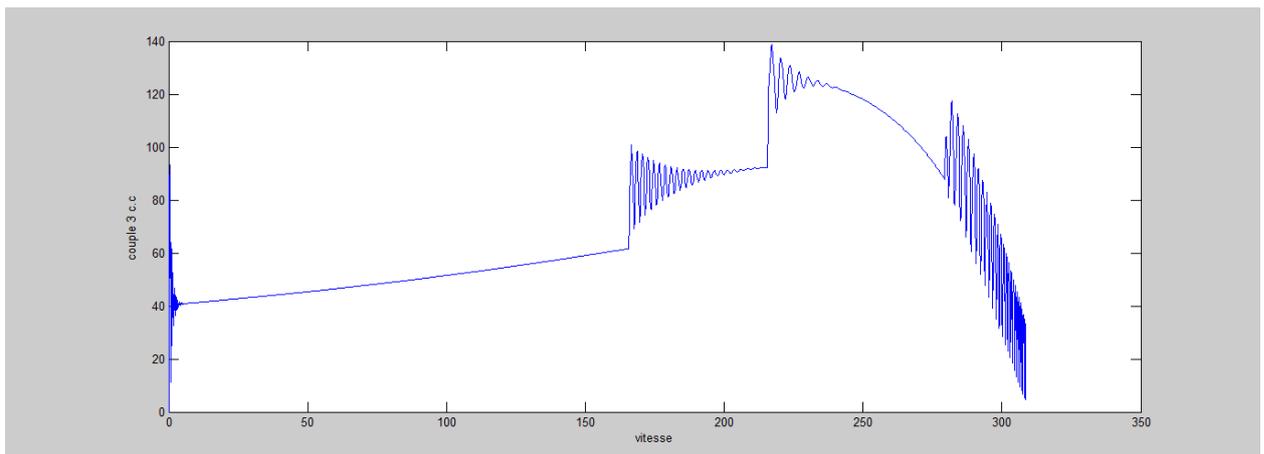


Figure. IV.40 : couple=f (vitesses)

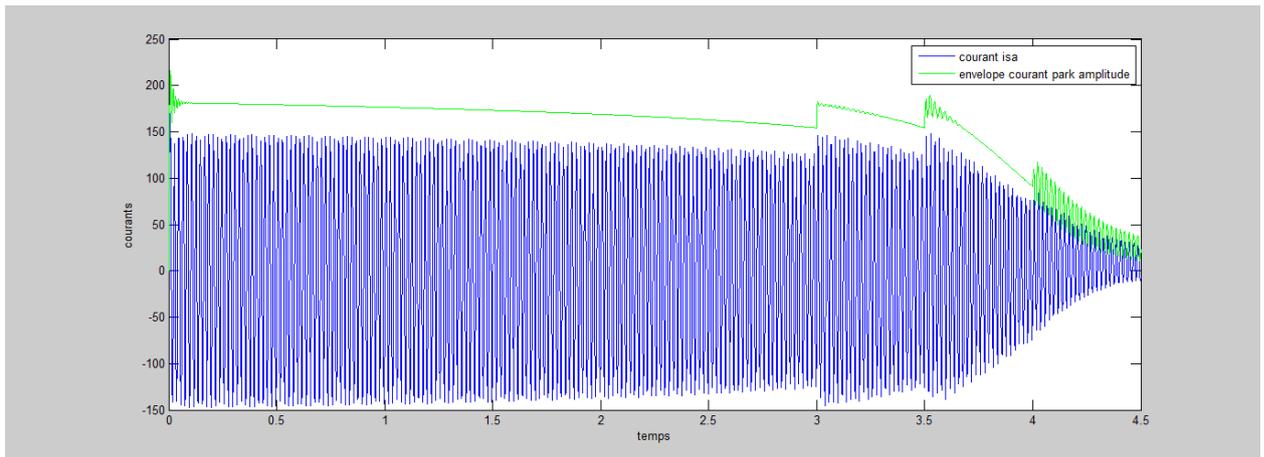


Figure.IV.41 : le courant Isa et l'enveloppe de Park

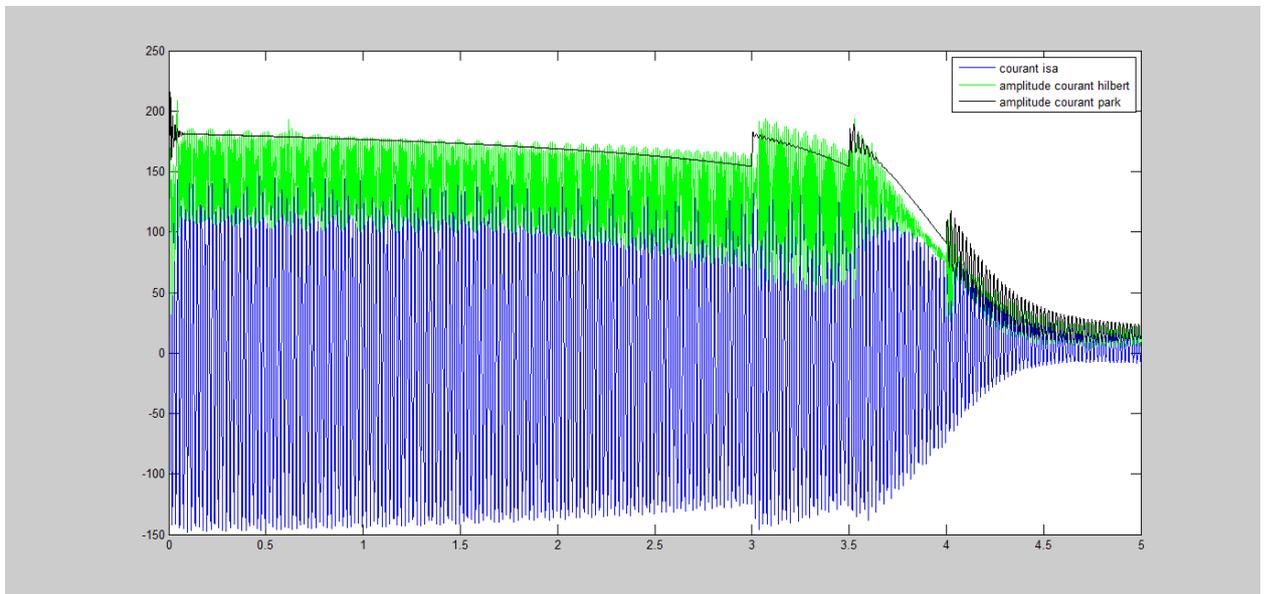


Figure. IV.42:le courant Isa et l'enveloppe de Park et Hilbert

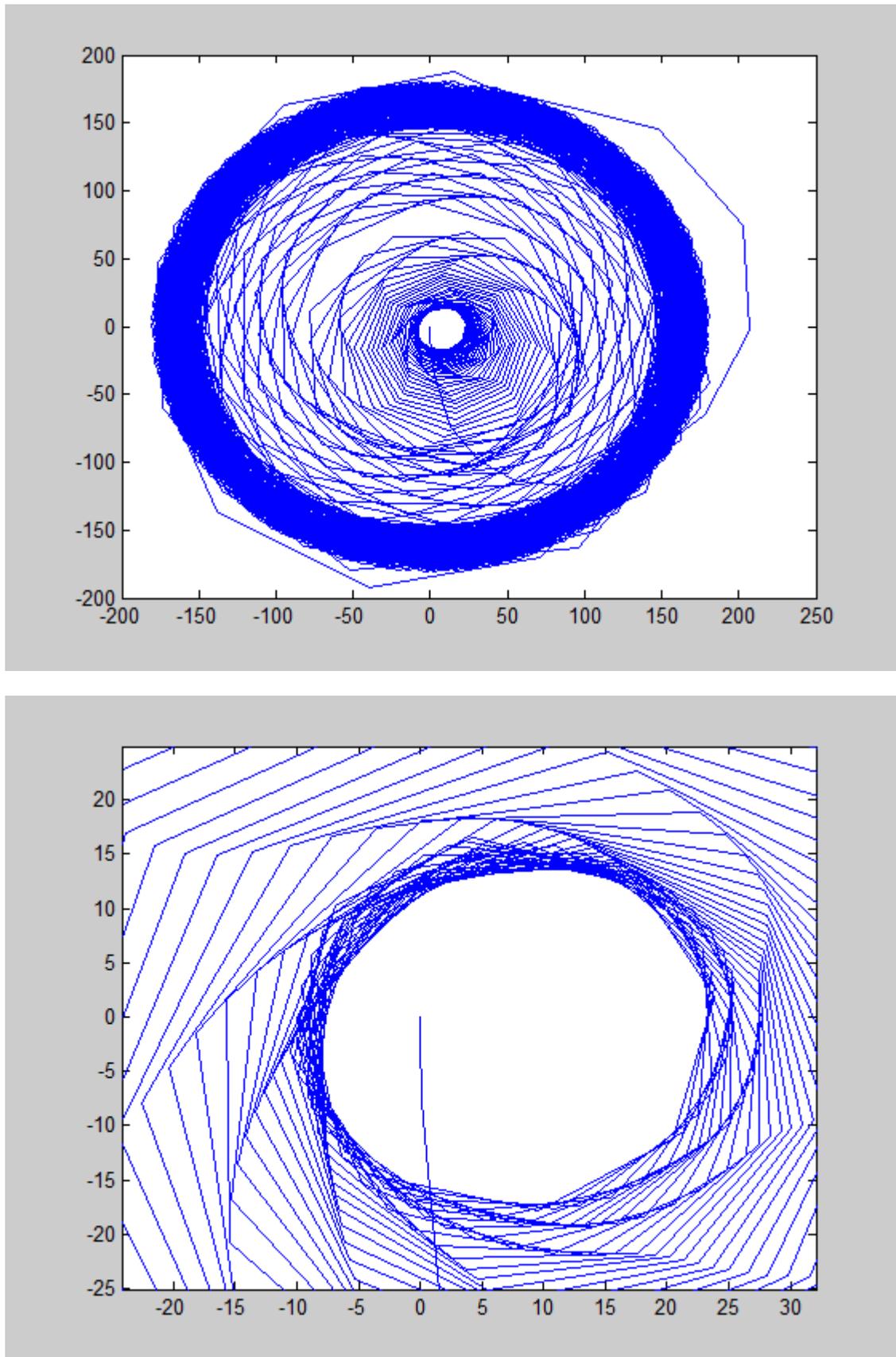


Figure. IV.43 : les déformations des sautoirs à cause de 3 c.c

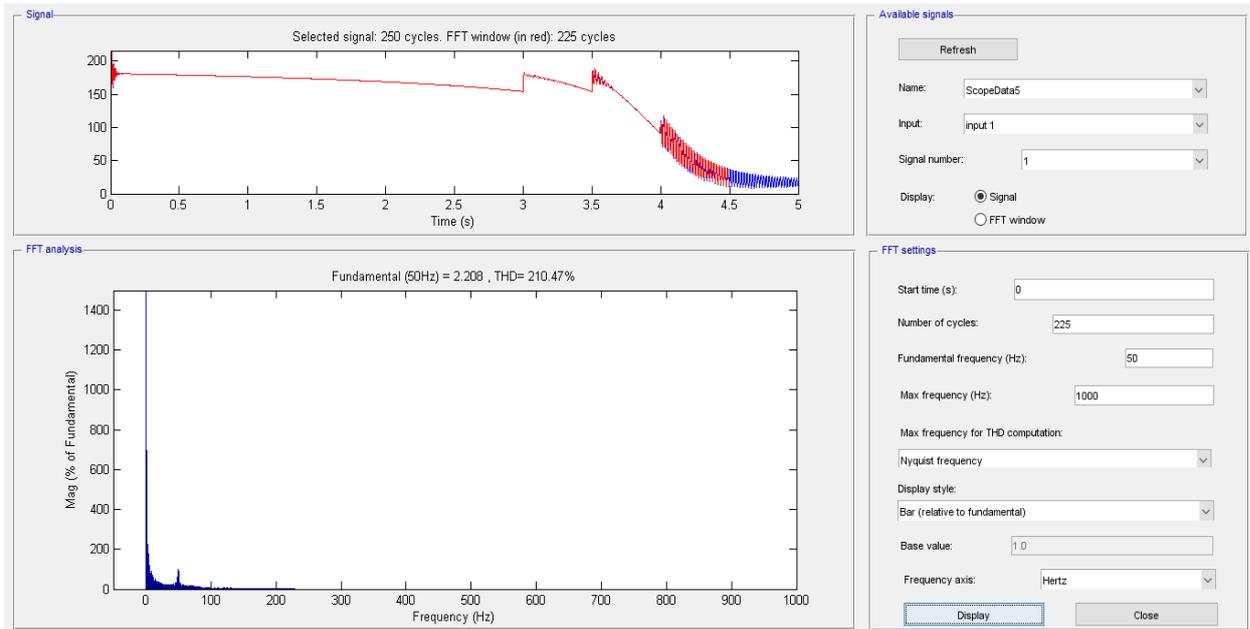


Figure. IV.44:enveloppe de Park amplitude avec fft pour détection de défaut 3c.c

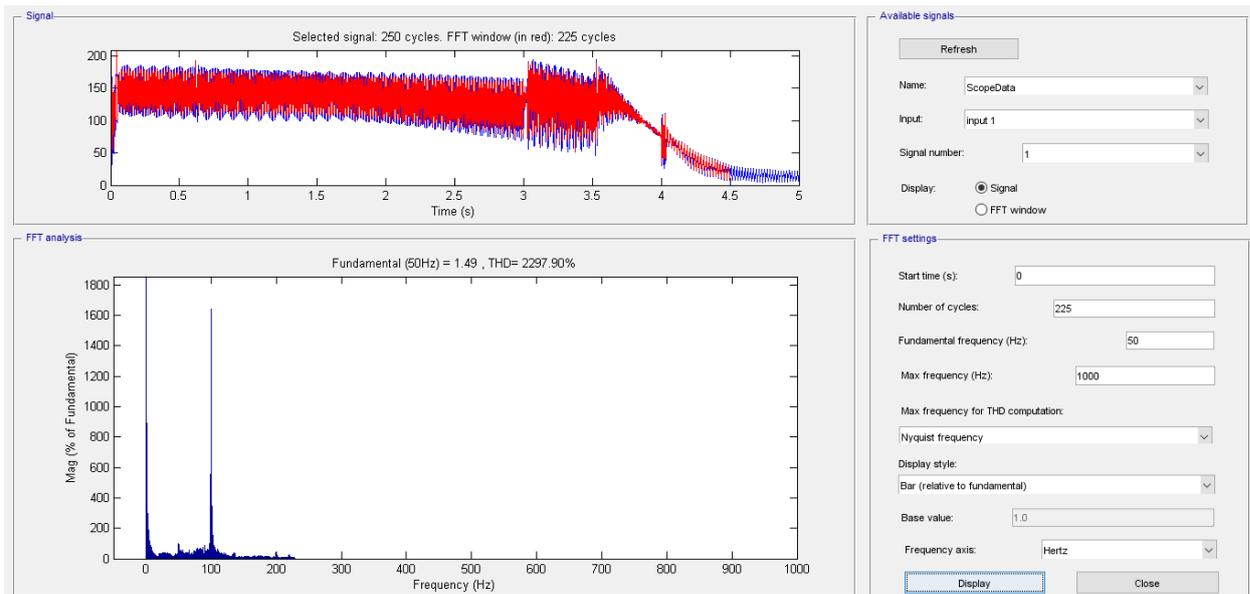


Figure. IV.45 : enveloppe de Hilbert amplitude avec fft pour détection de défaut 2c.c

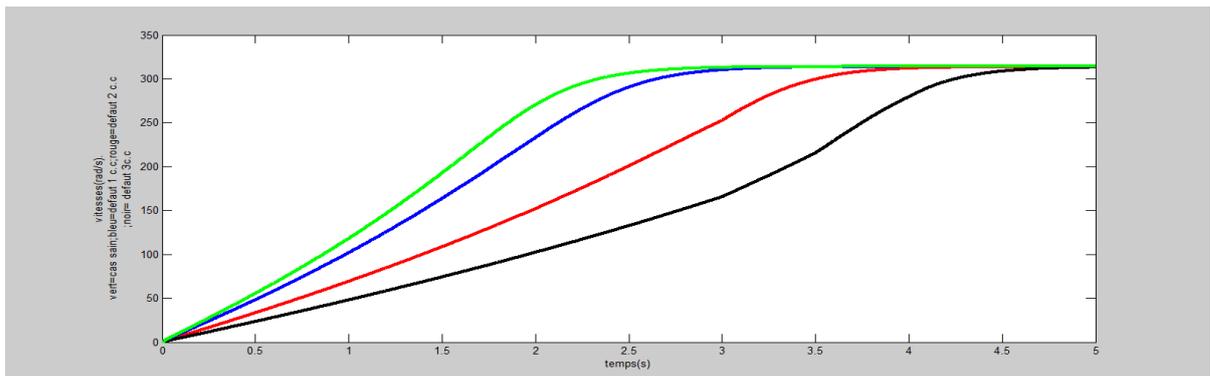


Figure. IV.46 : comparaison des vitesses de cas sain avec les défauts (court-circuits)

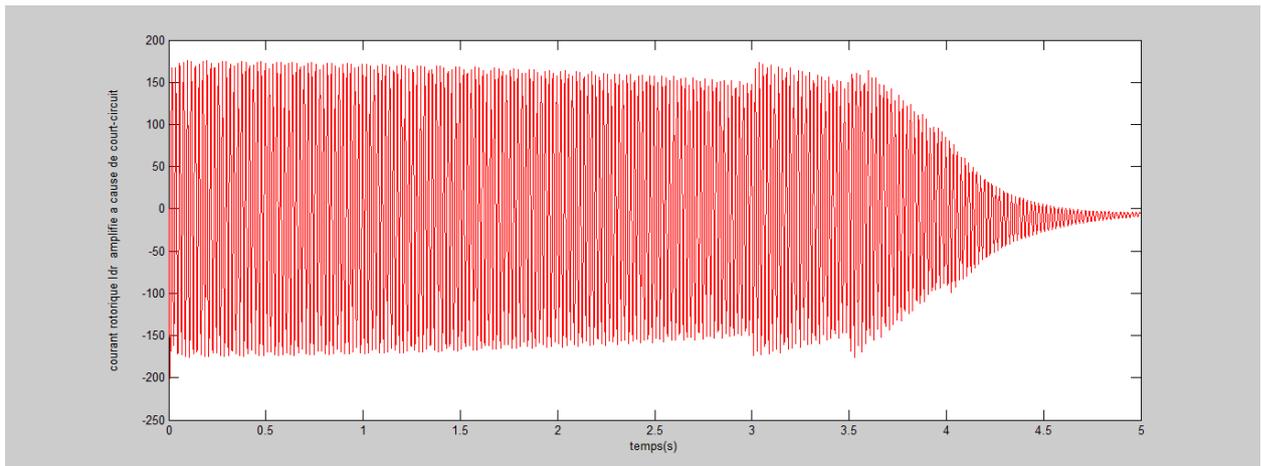


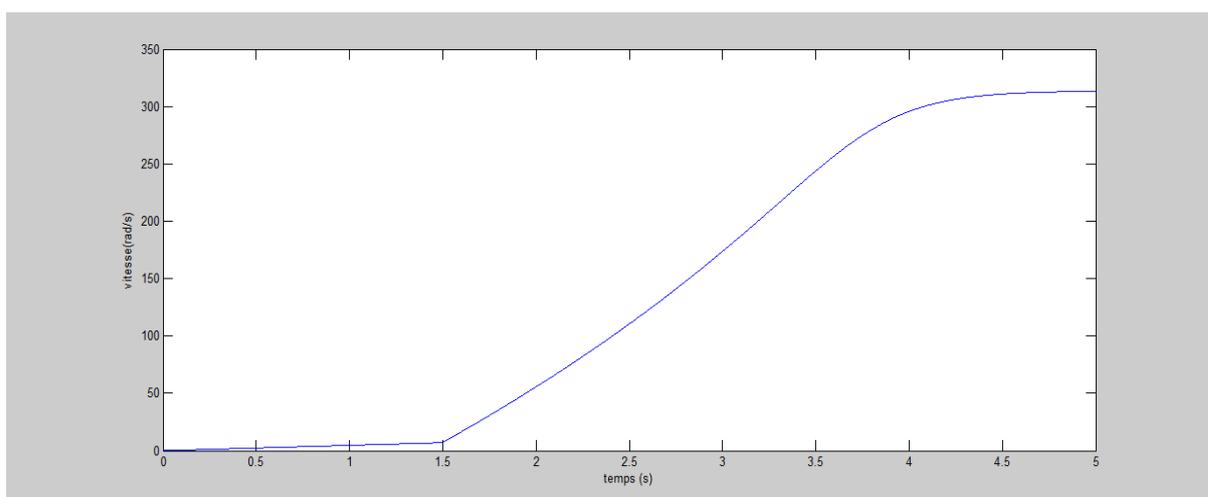
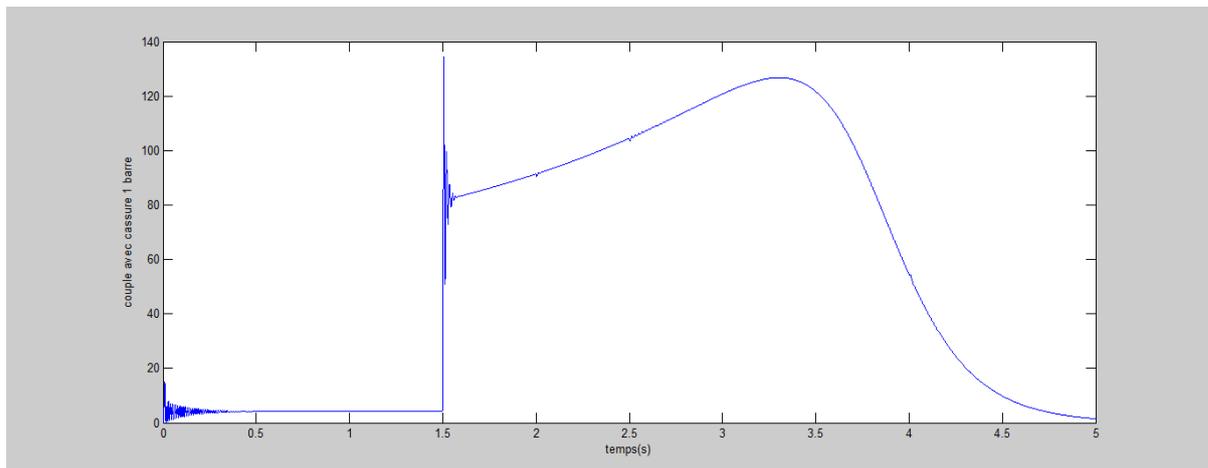
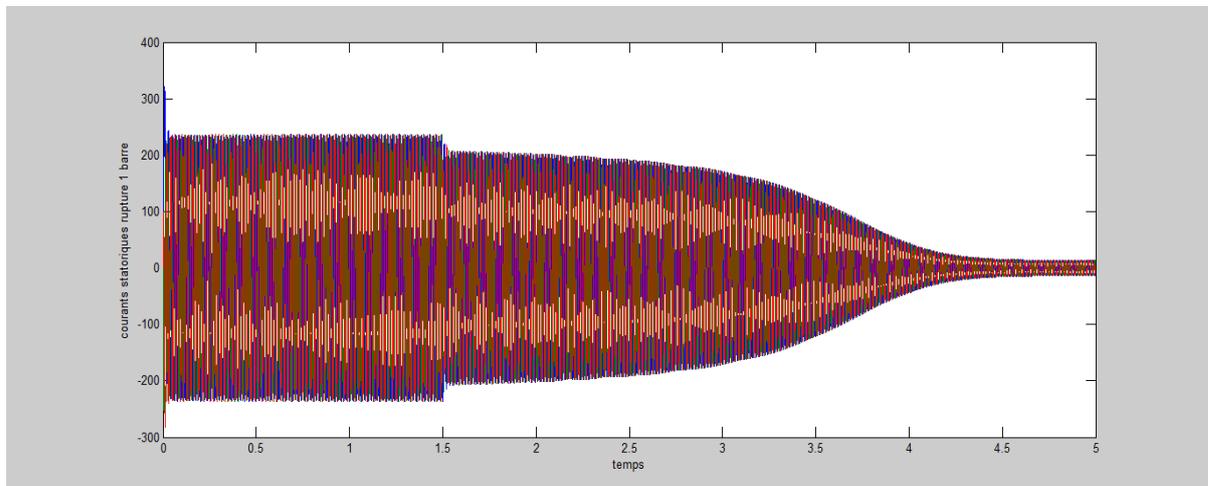
Figure. IV.47 courant Idr amplifié à cause de court-circuit

IV.6 Interprétation de résultats 2 :

Le court-circuit de sr a 100 % à l'instant $t=3s$ et 200% a l'instant $t=3.5s$; 300% à l'instant $t=4s$:

L'effet du court-circuit provoque un déséquilibre en amplitude et une petite oscillation des courants dans le bobinage statorique en court-circuit d'après la figure d'une façon générale, à la suite d'un court-circuit, apparaissent des oscillations de couple électromagnétique avant son annulation et de diminution légère de la vitesse mécanique. la conséquence des court-circuit apparaisse des harmoniques détectée par FFT principalement en appliquant l'enveloppe de Hilbert .mais l'enveloppe de Park en détecte les défauts par la déformation de lissajou. Les court-circuit au stator engendre aussi une amplification des courants dans la cage rotorique (barres et anneaux) comme le montre la figure, ce qui peut entraîner leurs détériorations.

IV.6-1 défaut cassures barre rotorique de cage d'écureuil :



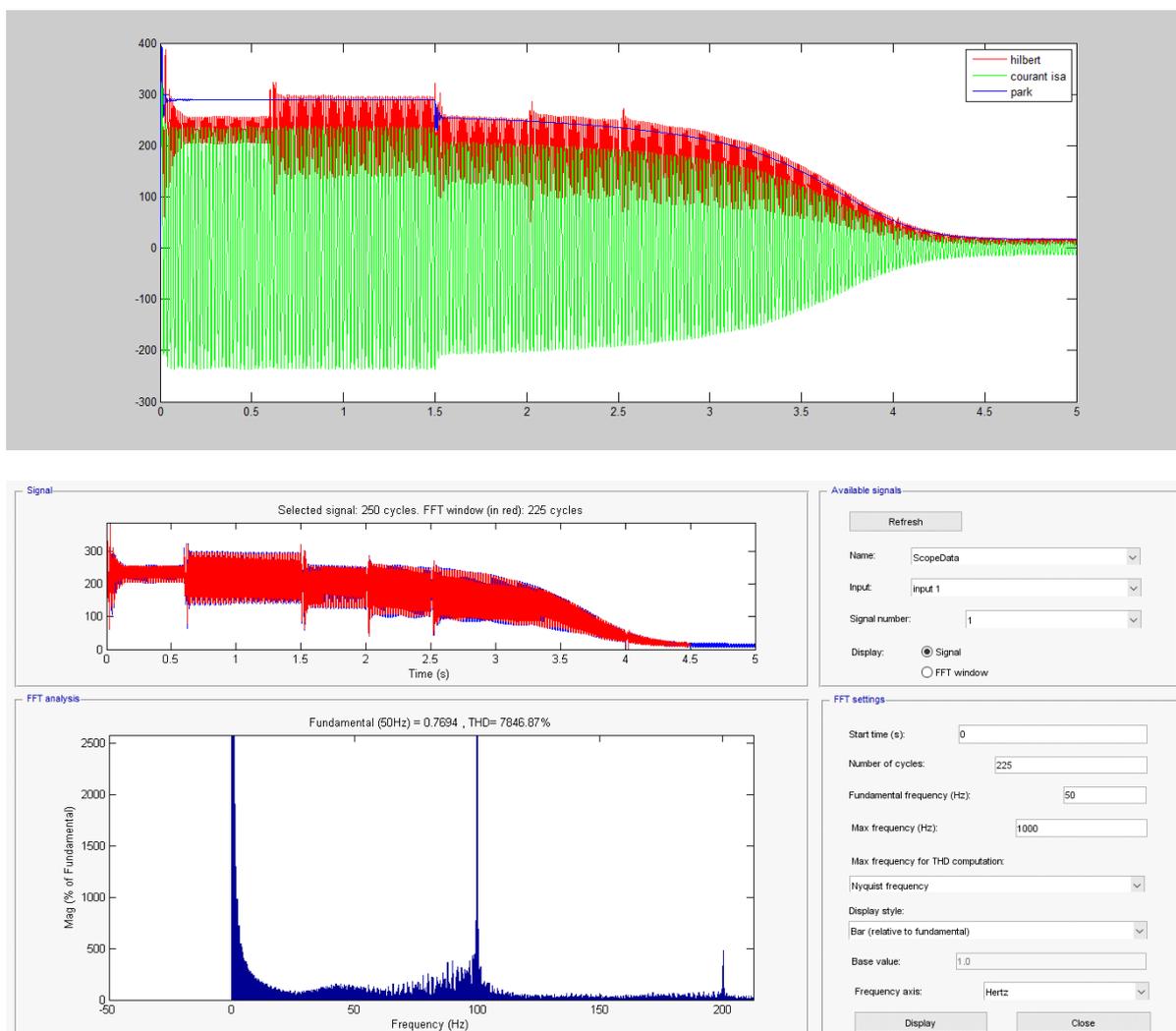


Figure. IV.48 enveloppe Hilbert avec les harmoniques détectée par fft

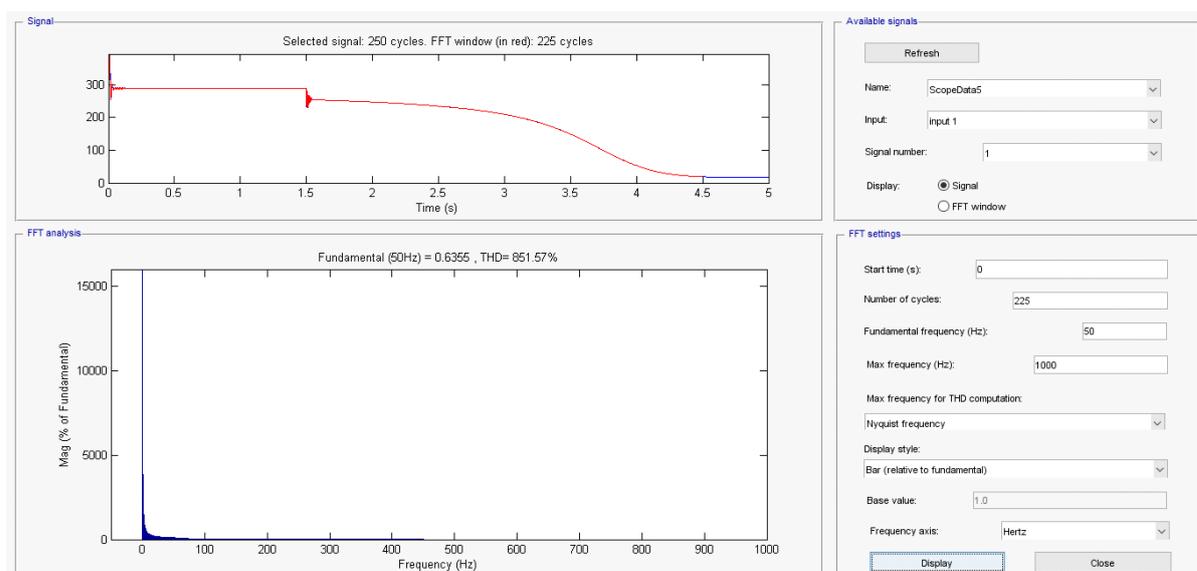


Figure. IV.49 enveloppe Park avec les harmoniques détectée par fft

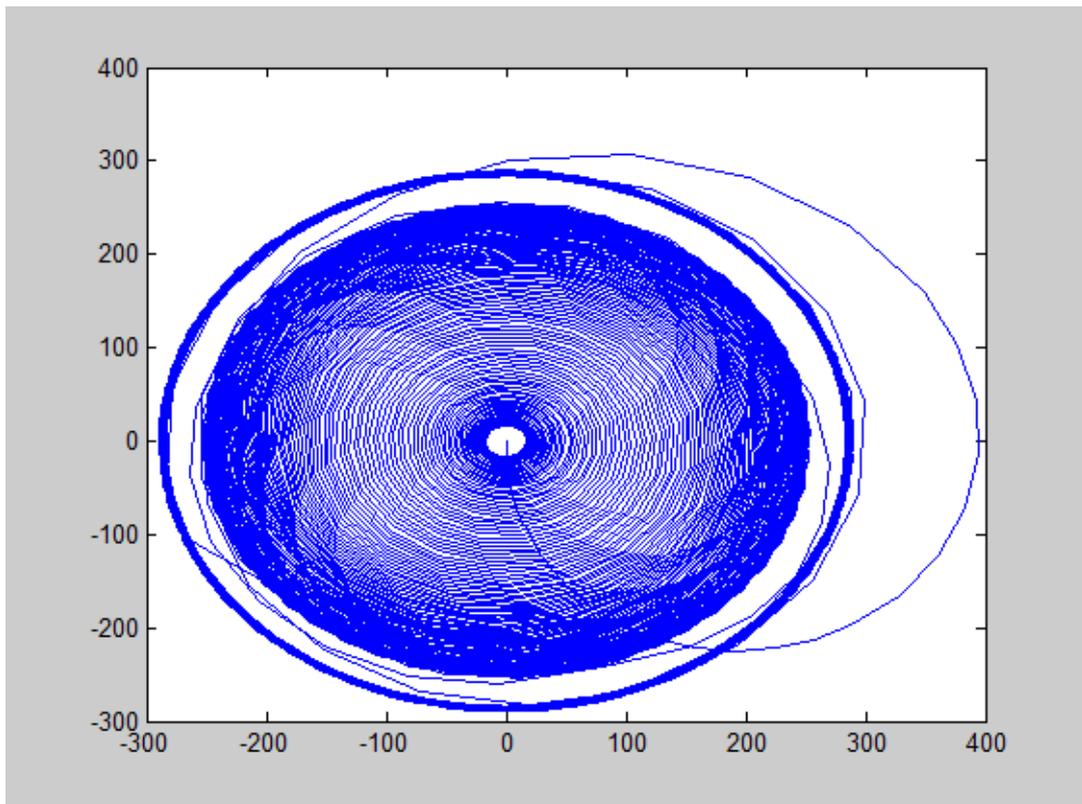
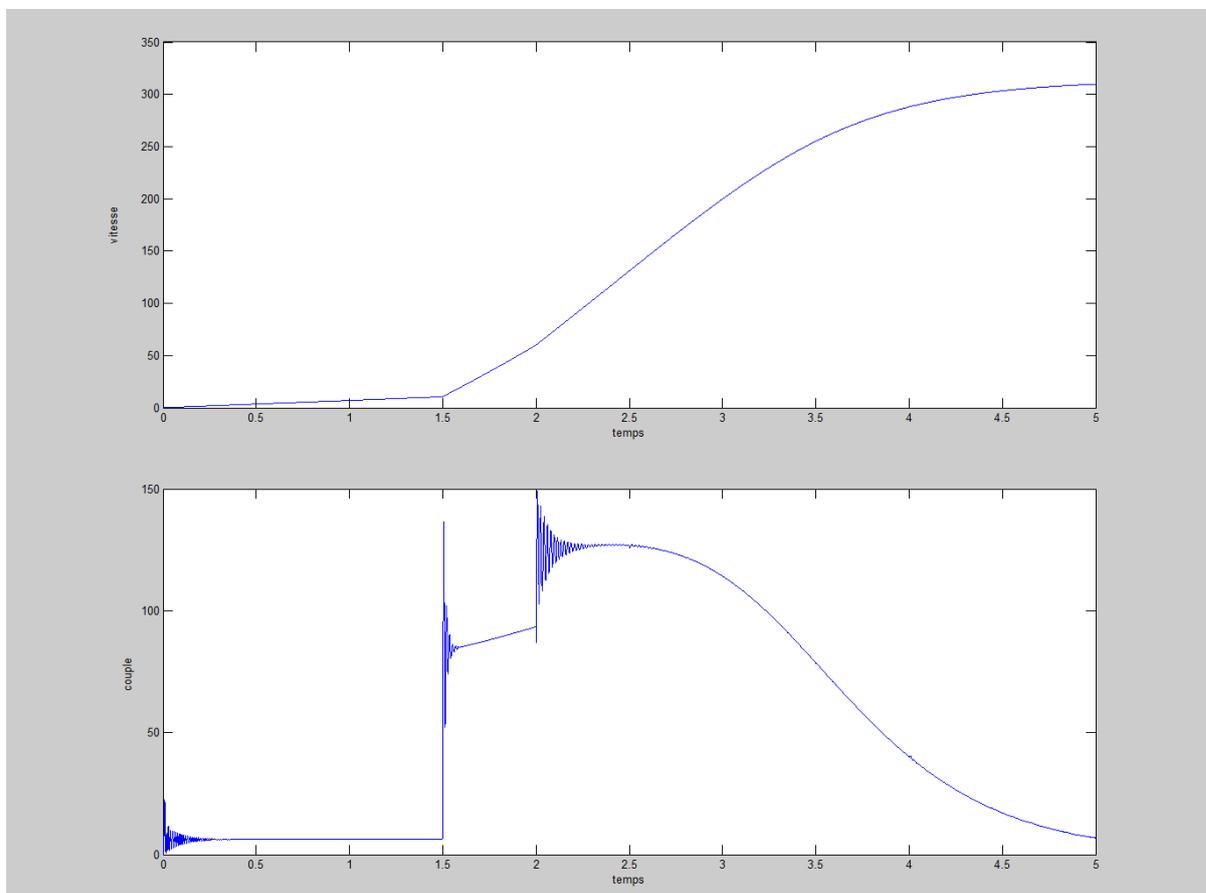
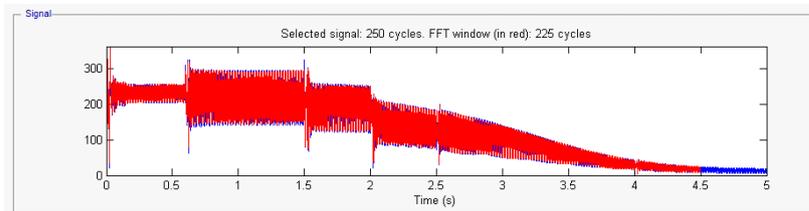
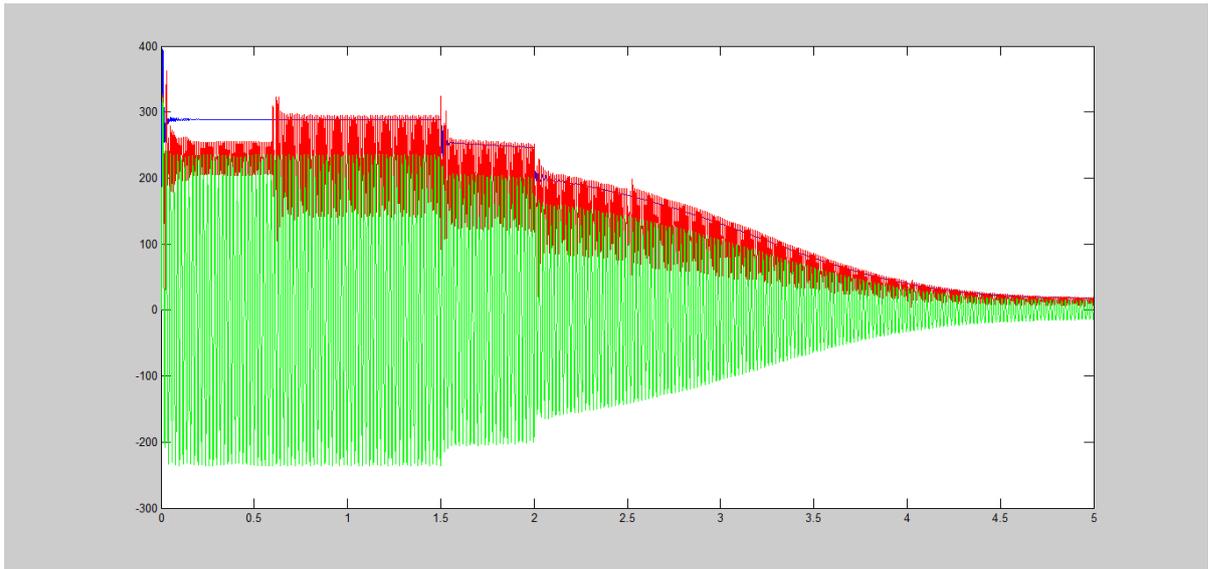


Figure. IV.50 lissajou Park un anneau vide 1 barre cassée Park détection





Available signals

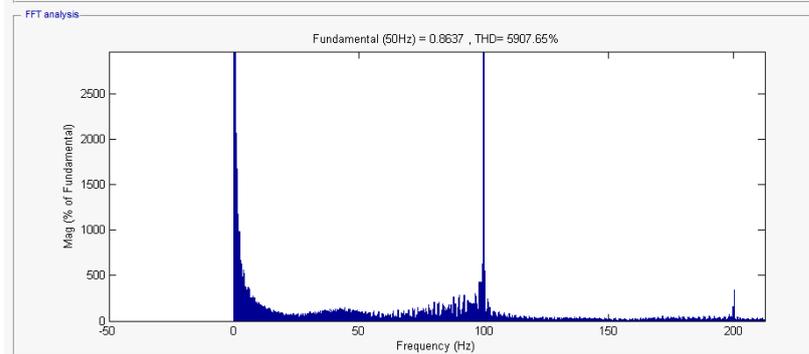
Refresh

Name: ScopeData

Input: Input 1

Signal number: 1

Display: Signal FFT window



FFT settings

Start time (s): 0

Number of cycles: 225

Fundamental frequency (Hz): 50

Max frequency (Hz): 1000

Max frequency for THD computation:

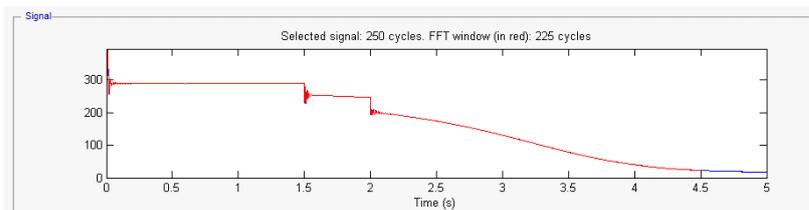
Nyquist frequency

Display style: Bar (relative to fundamental)

Base value: 1.0

Frequency axis: Hertz

Display Close



Available signals

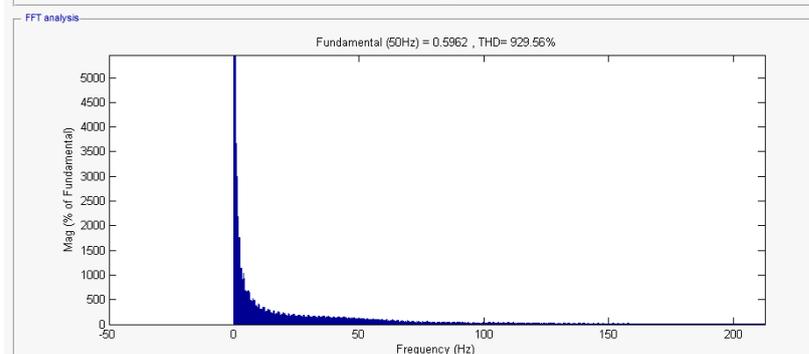
Refresh

Name: ScopeData5

Input: Input 1

Signal number: 1

Display: Signal FFT window



FFT settings

Start time (s): 0

Number of cycles: 225

Fundamental frequency (Hz): 50

Max frequency (Hz): 1000

Max frequency for THD computation:

Nyquist frequency

Display style: Bar (relative to fundamental)

Base value: 1.0

Frequency axis: Hertz

Display Close

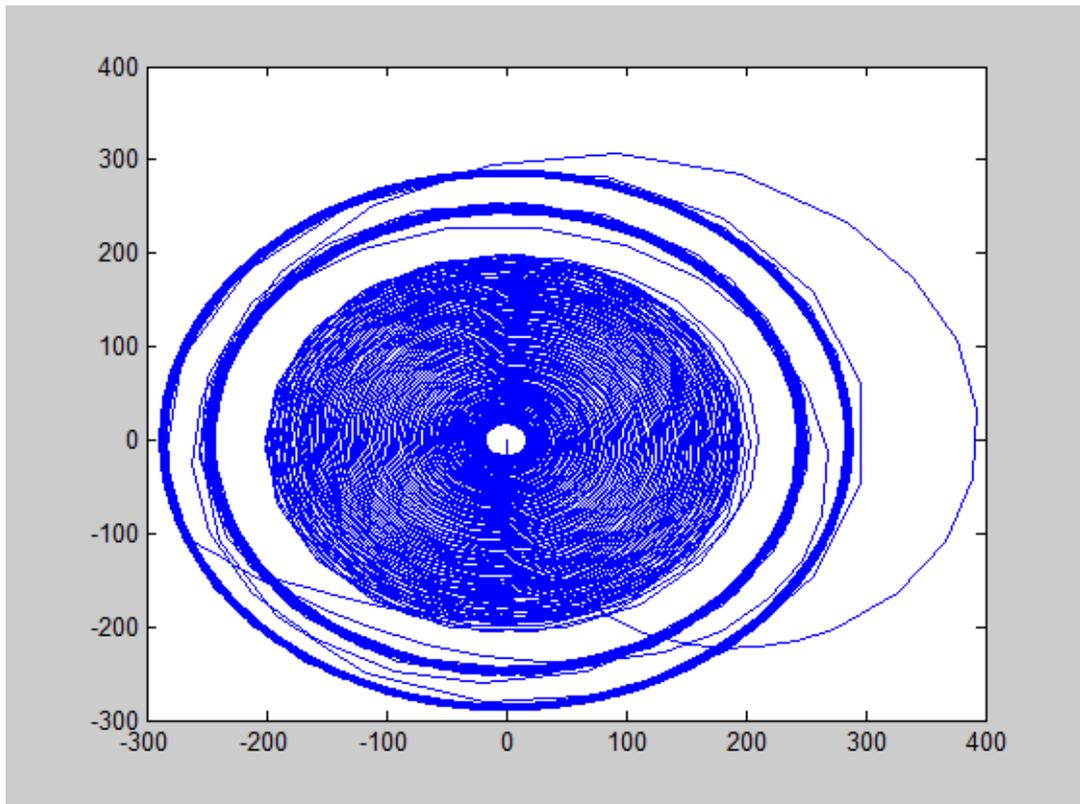
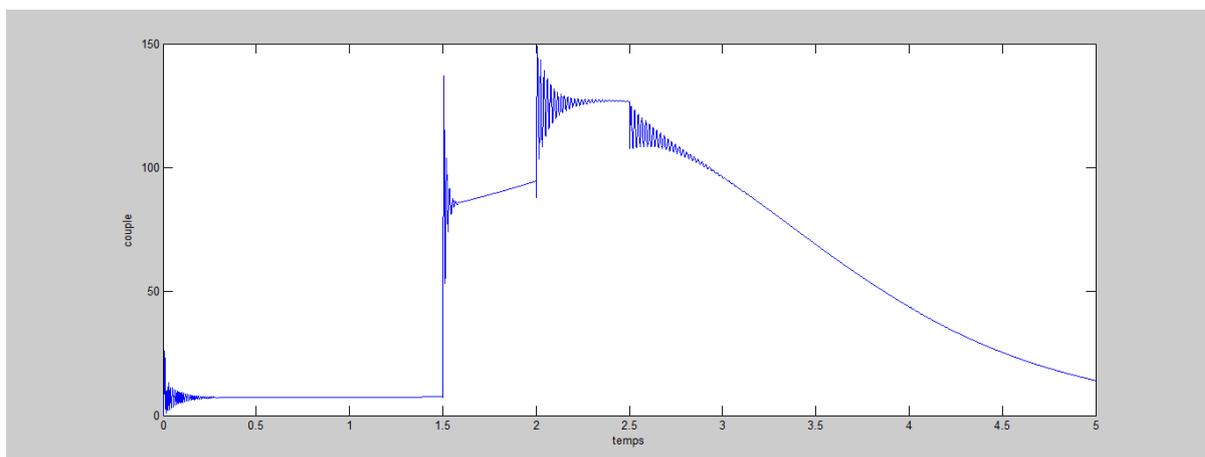
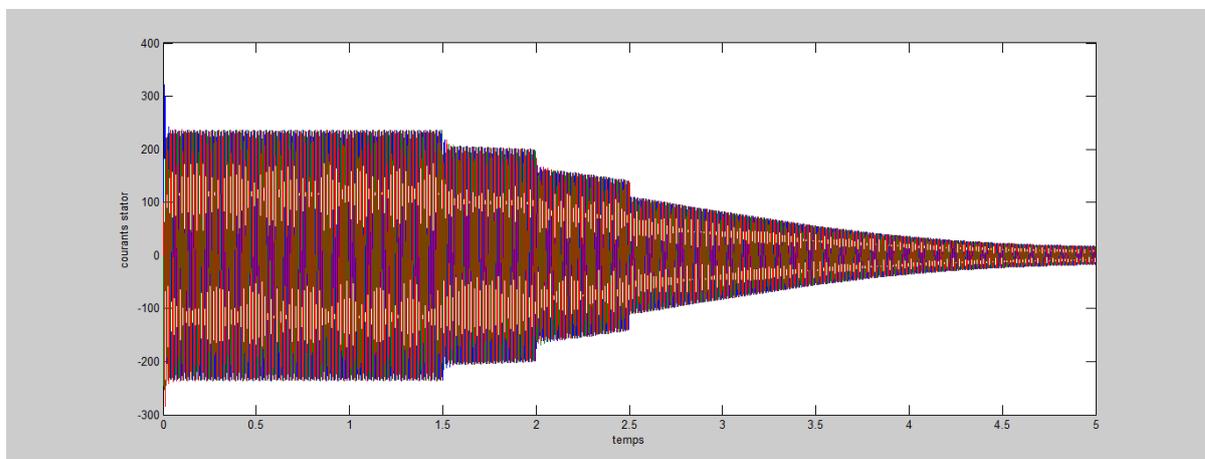
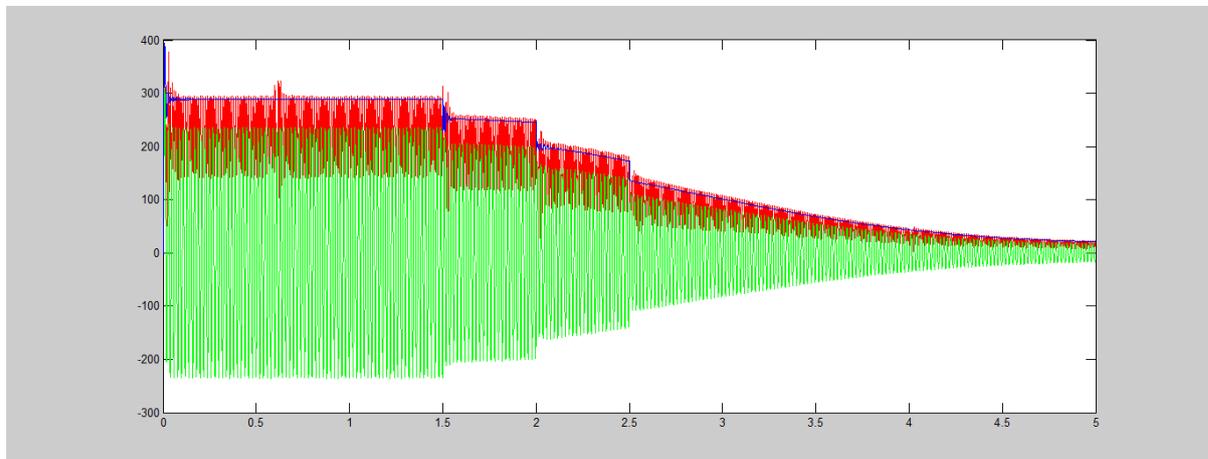
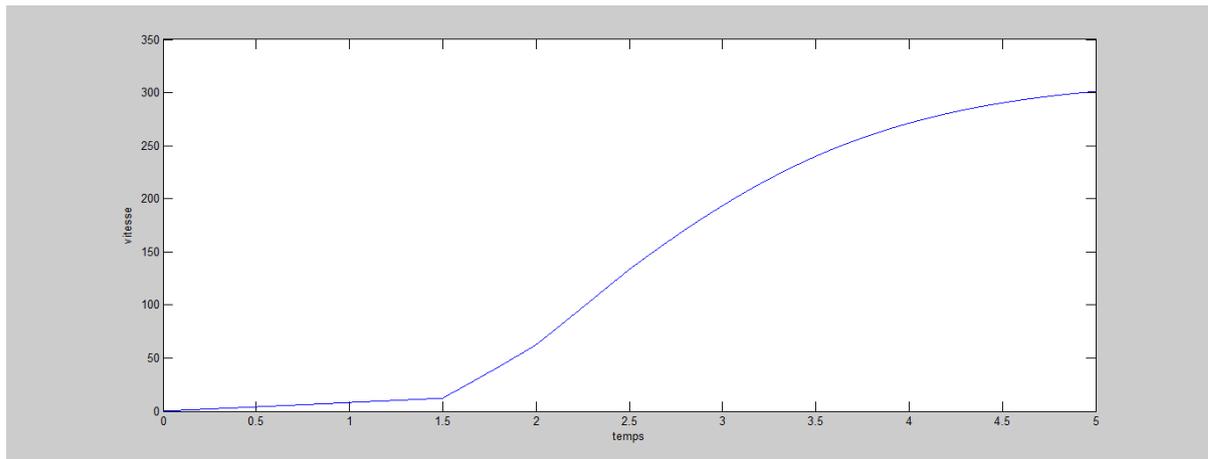


Figure. IV.51 lissajou Park deux(2) anneaux vides 2 barre cassée Park détection





Signal

Selected signal: 250 cycles. FFT window (in red): 225 cycles

Time (s)

Available signals

Refresh

Name: ScopeData

Input: input 1

Signal number: 1

Display: Signal FFT window

FFT analysis

Fundamental (50Hz) = 0.7431 , THD= 7418.90%

Mag (% of Fundamental)

Frequency (Hz)

FFT settings

Start time (s): 0

Number of cycles: 225

Fundamental frequency (Hz): 50

Max frequency (Hz): 1000

Max frequency for THD computation: Nyquist frequency

Display style: Bar (relative to fundamental)

Base value: 1.0

Frequency axis: Hertz

Display Close

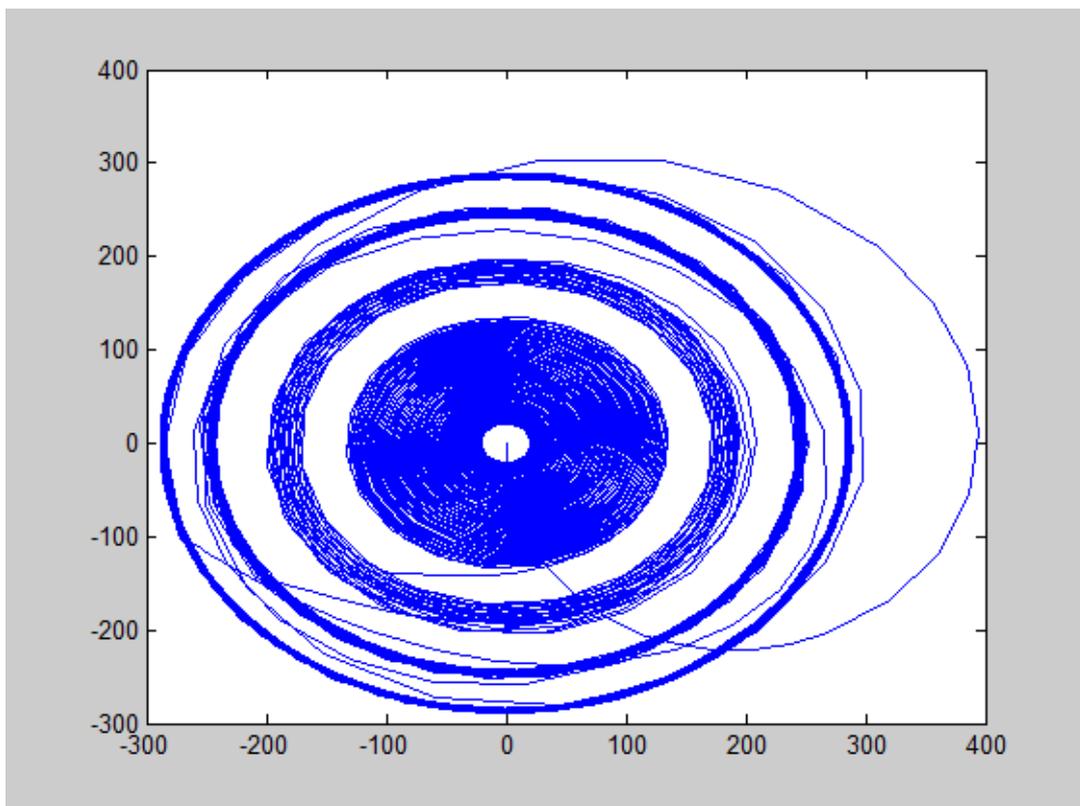
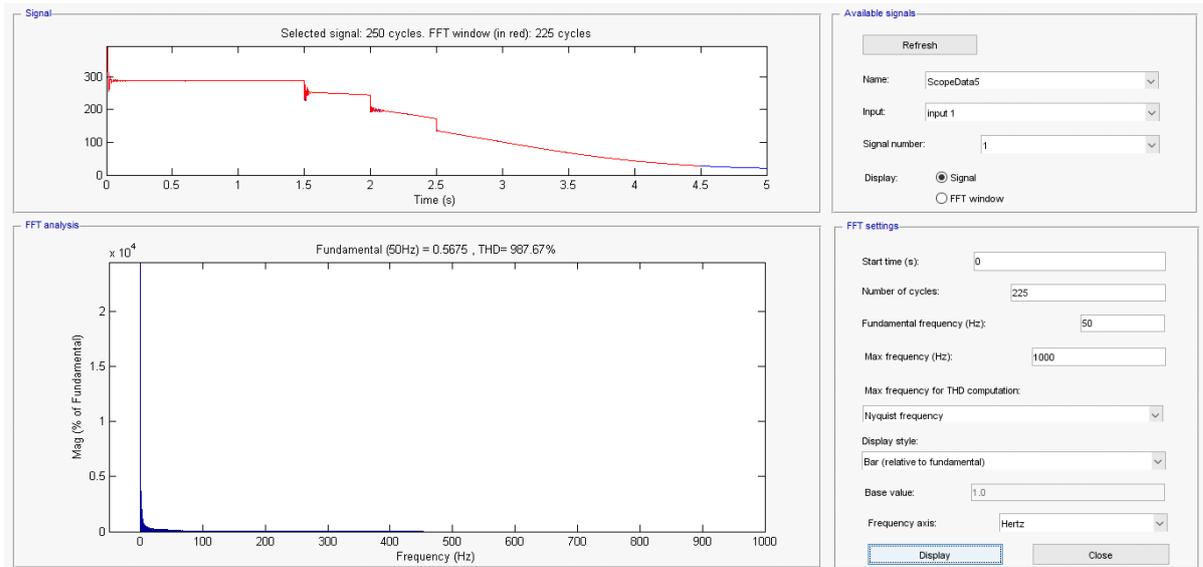
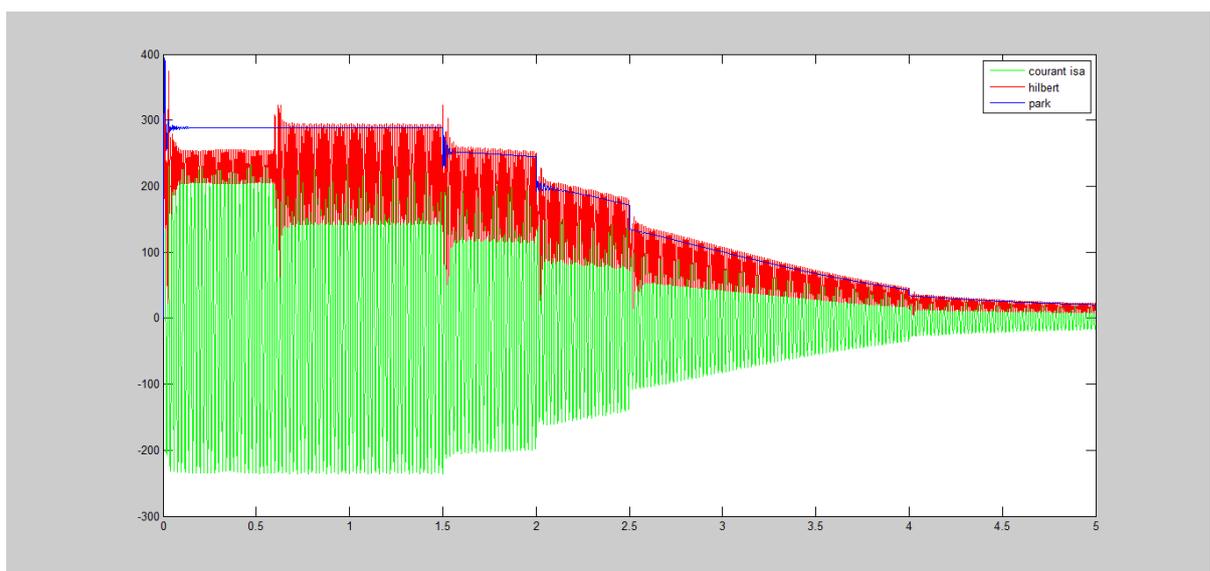
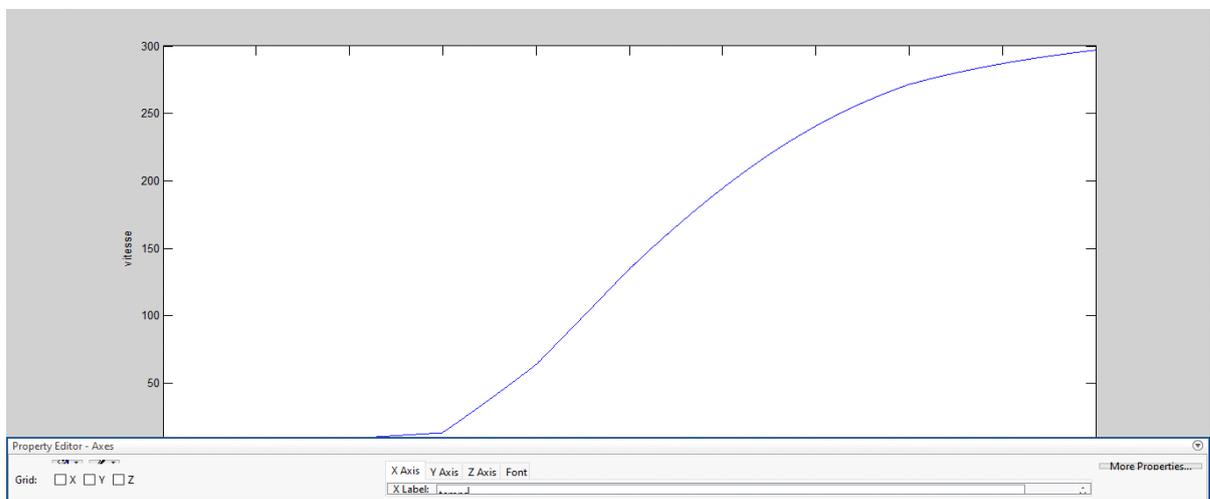
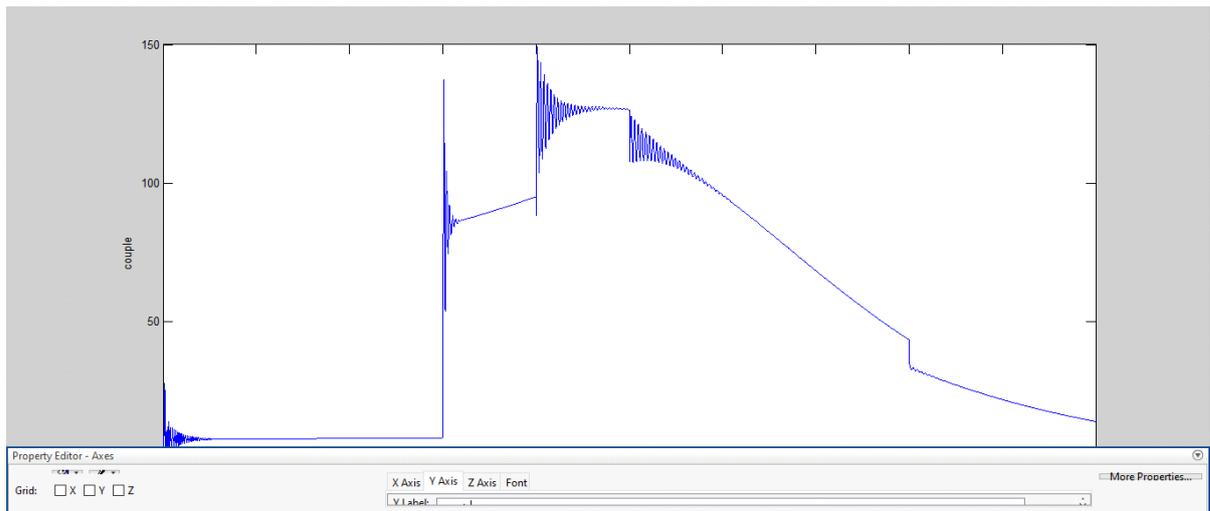


Figure. IV.52 Lissajous Park trois(3) anneaux vides 3 barre de rotor cassée Park détection



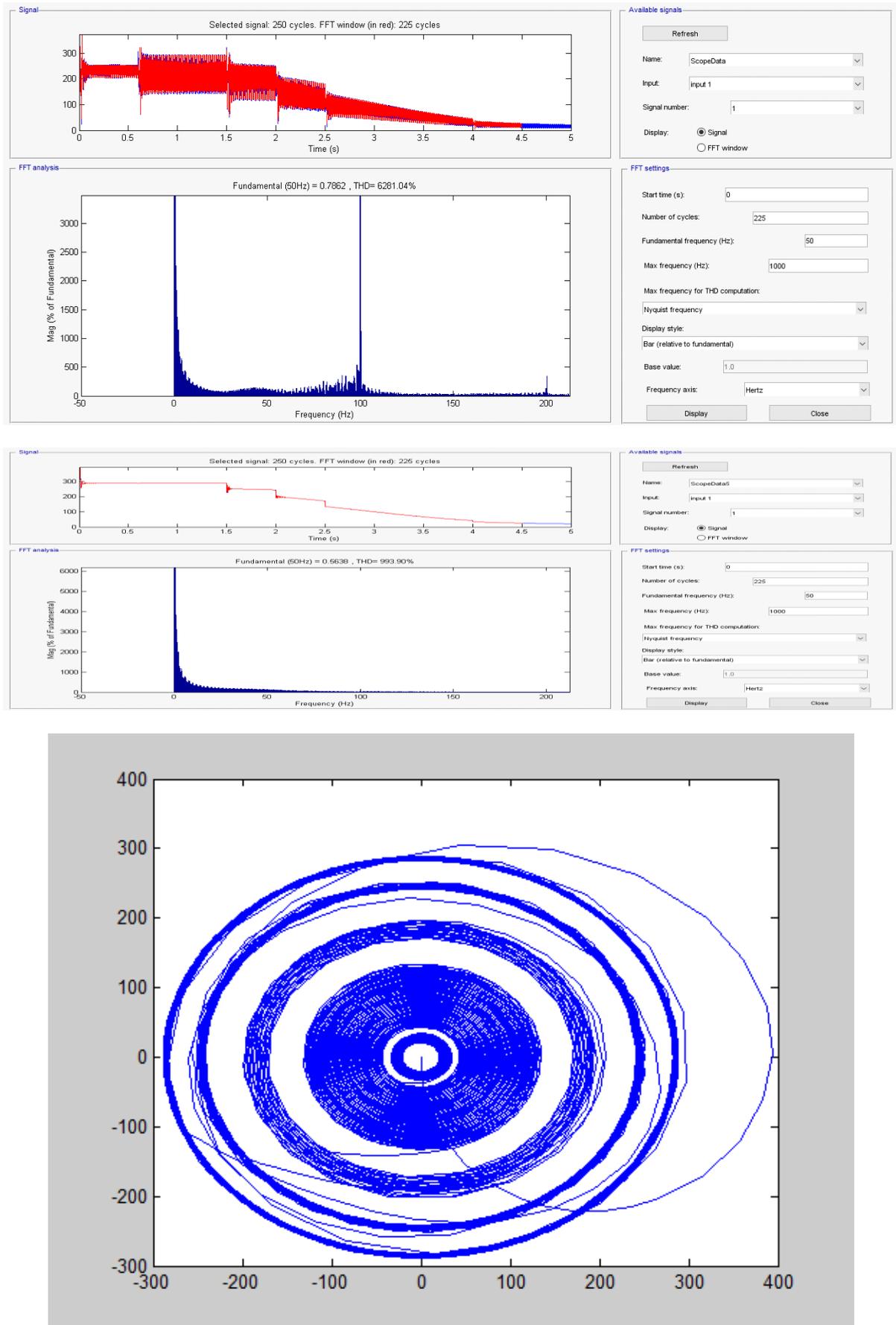


Figure IV.53 lissajou Park quatre(4) anneaux vides 4 barre de rotor cassée Park détection

IV-7 interprétation de résultats 3

IV-7-1- la rupture de 4 barreaux successivement : aux instants $t=1.5s$; $t=2s$; $t=2.5s$; $t=4s$

Avec les pourcentages de cassure de chaqu'un de barre :

- 1) premier barre 25% cassure.
- 2)deuxième barre 50% cassure.
- 3) troisième barre 100% cassure.
- 4)quatrième barre 200% cassure.

IV-7-2 défaut cassure barres :(aux instants $t=1.5s$; $t=2s$; $t=2.5s$; $t=4s$

Rr augmenté de premier barre 25% cassure ;deuxième barre 50% cassure ; troisième barre 100% cassure ;quatrième barre 200% cassure)

La rupture de barres provoque un déséquilibre du courant entre les barres du rotor. En comparant les courbes sain et défaillant dans les figures de courants statoriques et rotoriques, on constate que le courant dans la barre défaillant diminue fortement à $75[A]$ à $t=1.5s$ et engendre une surintensité importante $100[A]$ dans les barres adjacentes. Le fait que les barres adjacentes conduisent plus de courant entraîne une surchauffe de ces barres qui provoque un vieillissement accéléré et explique l'effet cumulatif sur la rupture de barres.

Une ondulation de l'amplitude du courant de phase statorique apparaît avec la cassure de barres rotorique.

IV-8 CONCLUSION :

Dans ce chapitre s'inscrit dans le cadre de la détection de défauts d'une machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil, on a vu plusieurs défauts (déséquilibre de la tension alimentation; inversion de phases alimentation ; court-circuit bobinages statoriques; cassure de barres rotor). Après plusieurs simulations de Park et Hilbert et à travers l'analyse des grandeurs temporelles du moteur (courant, couple, vitesse) et aussi les formes de Lissajous de Park les amplitudes (enveloppes) de Park et Hilbert.

CONCLUSION GENERALE

Les machines électriques à courant continu et synchrones, asynchrones nécessitent une détection rapide et diagnostic précoce de leurs défaillances, à cause de leurs utilisations fréquentes dans diverses applications.

Pour commencer notre étude, nous avons parlé dans le chapitre I : maintenance des moteurs électriques ou nous avons établi un état de l'art de des défauts que sont communs à tous les types de moteurs électriques et pouvant intervenir en général. et aussi on a parlé sur les différents types de maintenance applicables dans l'industrie. On a aussi étudié les techniques de la maintenance conditionnelle et parmi ces techniques (Analyse vibratoire. Analyse d'huiles Thermographie IR .Analyse acoustique).

Dans la deuxième chapitre, on a abordé les différents Types de défauts et spécialement les principaux défauts que sont en général (Défaits actionneurs; Défaits procédés ; Défaits capteurs). On a vu aussi les méthodes et les techniques de diagnostic les plus fréquemment utilisées dans le domaine des machines électriques. L'accent a été mis plus particulièrement sur la méthode de diagnostic basée sur modèle analytique. Puis, Méthodes de diagnostic sans modèle analytique, et comme l'intelligence artificielle est de plus en plus utilisée dans le domaine de la supervision et du diagnostic nous avons évoqué la Méthode par intelligence artificielle (IA).et on a terminé le deuxième chapitre par les Méthodes basées sur les données.

Le troisième chapitre on a fait une modélisation mathématique et simulation de moteur asynchrone et on a présenté le modèle de Park du moteur asynchrone, à savoir les équations électriques, magnétiques et l'équation mécanique. Après cela nous avons simulé notre modèle de Park sous Simulink/Matlab, les résultats obtenus confirment la validité de notre modèle lié au référentiel statorique. Ou on a dessiné les graphiques examinons les grandeurs (tension, couple, vitesse, courant,...) lors de l'alimentation de la machine par une source de tension équilibrée à vide ou à charge, nous a permis de connaître les caractéristiques des grandeurs électriques de la machine asynchrone pendant les régimes transitoire et permanent.

La quatrième et le dernier chapitre s'inscrit dans le cadre de la détection de défauts d'une machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil, on a vu plusieurs défauts (déséquilibre de la tension alimentation; inversion de phases alimentation ; court-circuit bobinages statoriques; cassure de barres rotor). Après plusieurs simulations de Park et Hilbert et à travers l'analyse des grandeurs temporelles du moteur (courant, couple, vitesse) et aussi les formes de Lissajous de Park les amplitudes (enveloppes) de Park et Hilbert.

Nous avons développé un cas de santé(sain) et un modèle de cas d'échec (défaits)pour nous aider à mieux comprendre le comportement de la machine, puis simulé ces deux modèles sur MATLAB / SIMULINK. Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence des défauts tels que des tiges de rotor cassées, des Courts-circuits statoriques et des défauts d'alimentation en tension de notre moteur à cage d'écureuil.

À l'avenir, nous espérons obtenir des modèles de simulation plus précis en utilisant l'intelligence artificielle: (réseaux de neurones; la logique floue)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] P.J. Travner, B.G. Gaydon and D.M. Ward, "Monitoring generator and large motors", IEE Proceeding May 1986.
- [2] M'hamed Drif et al, "Induction motor load effect diagnostic utilizing instantaneous power spectrum", EPE' 2001.
- [3] Mouloud Ayad «Recherche de signatures robustes des défauts dans une machine tournante a travers l'analyse de signaux vibratoires»,Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas, Sétif,2015.
- [4] Mikhaïl KostenkoEt LudvikPiotrovski «Machines électriques I, Machines à courant continu, transformateurs», Éditions de Moscou (MIR), 1969, 3éme édition, 1979.
- [5] Charles Harel, «Machines électriques et essais de Machines», Société française des électriciens, École supérieure d'électricité, Paris, 1960.
- [6] P. Zimmermann, « Electronically commutated D.C. feed drives for machines tools », Robert Bosch GmbH – Geschäftsbereich Industrieaurusting, Erbach, Germany September 1982.
- [7] Claude Chevassu, « Machines électriques » Cours et problèmes, Ecole nationale supérieure de Maritime, 20 juillet 2012.
- [8] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur pas à pas](https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_pas_à_pas).
- [9] ANDRIAN CEBAN 2012 « METHODE GLOBALE DE DIAGNOSTIC DES MACHINES ELECTRIQUES » Thèse de doctorat, 2012.
- [10] Belhamdi Saad« Diagnostic des défauts de la machine a synchrone contrôle par différent technique de commande» thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra,2014.
- [11] Bensana Toufik « Diagnostic des défaillances basé sur l'analyse vibratoire d'une turbine à vapeur» Mémoire de magister en génie mécanique, Université Badji Mokhtar, Annaba, Année 2008.
- [12] Omar Djebili « Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants. Application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement.» thèse de doctorat en génie mécanique, Université de Reims champagne Ardenne, septembre 2013.
- [13] Hanene Benmohamed « Etude de l'usure des engrenages par analyse vibratoire » Mémoire de magister en génie électromécanique, Université Badji Mokhtar, Annaba, année 2010.
- [14] D. G. Dorrell and A. C. Smith, « Calculation of UMP in induction motors with series orparallel winding connections», IEEE Transactions on Energy Conversion, 1994.
- [15] D. G. Dorrell, W. T. Thomson, and S. Roach, « Analysis of air gap 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, January/February 1997.

BIBLIOGRAPHIE

- [16] 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 , May 2011.
- [17] G. Didier « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances ». Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, 2004.
- [18] O. Ondel « Diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur machine asynchrone ». Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, 2006.
- [19] R. Casimir «Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes ». Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, 2003.
- [20] TOUAMA El hadj« Evaluation des performances de la maintenance des systèmes de production» Mémoire de master ISE, Msila, 2013/2014.
- [21] 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, Juin 2002.
- [22] Zwingelstein, G. : Diagnostic des Défaillances Théorie et Pratique pour les Systèmes Industriels, Editions Hermès, 1995
- [23] Ondel O., Diagnostic par reconnaissance des formes : Application à un ensemble convertisseur - machine asynchrone, Thèse de doctorat de l'École Centrale de Lyon, 2006
- [24] Dubuisson, B. : Diagnostic et reconnaissance des formes. Hermes, Paris, 1990.
- [25] Raison, B. ,Rostaing, G. ,Butscher, O. ,Maroni, C.S. : Investigations of algorithms for bearing fault detection in induction drives, 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'02), vol.2, No- vembre 2002, pp.1696-1701
- [26] Zhang, Y., Jiang, J., 2008. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. Annual Reviews in Control 32, 229–252.
- [27] Mémoire magister Moghrani radhouane -stratégies de contrôle d'une machine asynchrone alimentée par convertisseurs électroniques 2008/2009
- [28] Matlab 5.2 et 5.3 et simulink 2 et 3 pour étudiants ingénieurs /Mohand Mokhtari Berlin ;eidelberg; New york; barcelona 2000.
- [29] Wildi;Telectrical Machines,Drives and power systems,prentice hall in,1997.
- [30] Guy 1997clec guy grellet<actionnaires electriques principes /modeles /commandes).edition eyrolles ,paris 1997
- [31] seguier G<Modélisation et commande de la machine à réluctance variable.prise en compte de la saturation magnétique >.EditionU.F.R sciences techniques 2003
- [32] patrick brunet <Introduction à la commande vectorielles des machines asynchrones >.LTEG Henri Brisson,Paris 1993.

BIBLIOGRAPHIE

[33] : Livre Génie Industrielle. Maintenance Industrielle de l'entretien de base à l'opération de la sureté / Jean-Marie AUBERVEILLE / 2004.

[34] : Livre Cours de Maintenance Industrielle/TEC 336/ Ismail BENISSAAD/UNIV.MENTOURI-CONSTANTINE/FACULTÉ DES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR / 2007-2008.

[35] : AFNOR Maintenance industrielle – Fonction maintenance, FD X60-000, Mai, 2002.

[36] : Bouif. A .Stratégies de maintenance.

[37] : J. Châtelain, 'Machines Electriques', Traité d'Electricité, tome X, Presse Polytechniques Romandes, Lausanne, 1983.

[38]: A.J.M. Cardoso et al, 'Rotor Cage Fault Diagnosis in Three-Phase Induction Motors, by Park's Vector Approach', 30th Ind. Appliquéd. Society Annula Meeting, pp. 642-646, Oct., 8-12, 1995, Orlando, Florida.

[39]: M. Drift et al. 'Application de l'Analyse Spectrale du Courant Statorique à la Détection des Défauts dans les Moteurs Asynchrones Triphasés', ICEL'98, pp. 529-534, Oct., 5-7, 1998, Oran, Alegria.

[40]: A.J.M. Cardoso et al., 'The Use of Park's Vector in the Detection of Electrical Failures on Three-Phase Induction Motors', Proceed. Int. AMSE Confer. 'Modeling & Simulation', Vol. 2C, pp. 99-109, March 2-4, Cairo, Egypt, 1987

[41]: P.J. Tanner and J. Penman, 'Condition Monitoring of Electrical Machines', Researches Studies Press, John Willey & Sons, 1998.

[42]: P. Vas, 'Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines', Oxford University Press, 1993.

[41]: A.J.M. Cardoso et al., 'Computer Aided Detection of Air gap Eccentricity in Operating Three Phase Induction Motors, by Park's Vector Approach', IEEE, Ind. Applica. Society Annual Meeting, Vol. 1, pp. 94-98, Sept. 28 – Oct. 4, 1991, Dearborn, Michigan.

ANNEXE1:

Block Parameters: ✕

Subsystem (mask)

Parameters

nombre de paires de poles

résistance statorique [Ohm]

résistance rotorique [Ohm]

inductance statorique [mH]

inductance rotorique [mH]

inductance mutuelle [mH]

moment d'inertie [Kg*m²]

coefficient de frottement [N*M*s/rad]